

Dyfrakcyjny pomiar naprężeń w mikro- i makroskali

Elżbieta Gadalińska (ILot)

Andrzej Baczmański (WFiIS, AGH)

Jerzy Kaniowski (ILot)

Sebastian Wroński (WFiIS, AGH)

Rim Dakhlaoui (ENSAM, Paris)

Léa Le Joncour (UTT, Troyes)

Instytut Lotnictwa



- Cztery piony merytoryczne
 - Centrum Nowych Technologii
 - Engineering Design Center
 - Centrum Badań Materiałów i Konstrukcji
 - Net Instytut



SPINA

Symposium Pomiarów i Interpretacji Naprężeń

- Inicjatywa Instytutu Lotnictwa, Oddziału Metali Lekkich Instytutu Metali Nieżelaznych w Skawinie i dr inż. Andrzeja Wojtasa (METLAB Proto)
- Cel: integracja środowiska naukowców zajmujących się metodą, rozpowszechnianie wiedzy o metodzie i zainteresowania nią przemysłu, wymiana doświadczeń i „dobrych praktyk”



SPINA

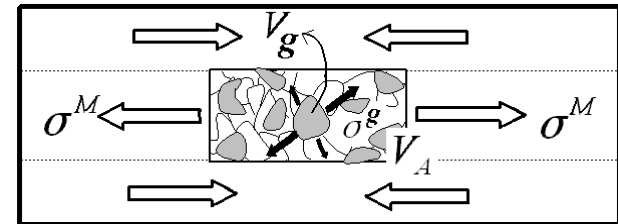
Symposium Pomiarów i Interpretacji Naprężeń

- Uczestnicy 1. Spotkania (ILot)
 - AGH (Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej i Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej)
 - Instytut Lotnictwa
 - Oddział Metali Lekkich Instytutu Metali Nieżelaznych w Skawinie
 - IMIM PAN
 - Politechnika Rzeszowska
 - Politechnika Łódzka
 - Metlab Sp. Z o.o.

- Uczestnicy 2. Spotkania (OML w Skawinie)
 - +
 - Politechnika w Pradze
 - Uniwersytet Śląski
 - Politechnika Częstochowska

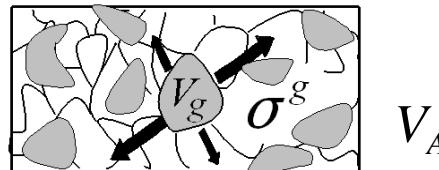
Naprężenia w materiałach polikrystalicznych klasyfikacja

- I rzędu

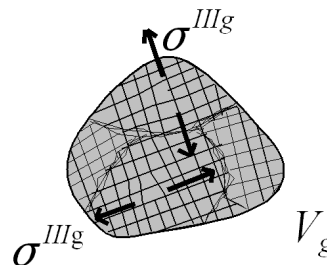


$$\text{● } ph_1 \in V_{ph1} \quad \text{◐ } ph_2 \in V_{ph2}$$

- II rzędu

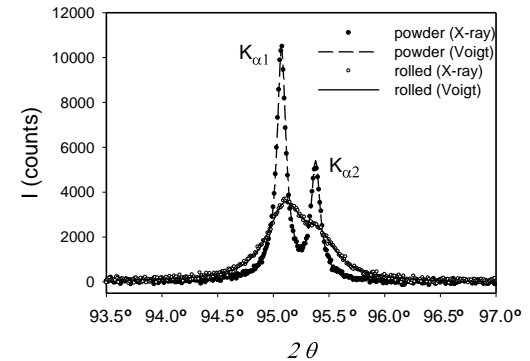
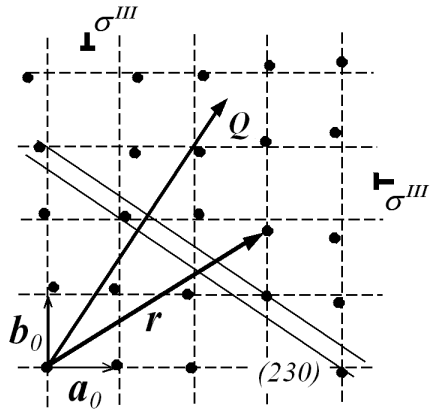


- III rzędu

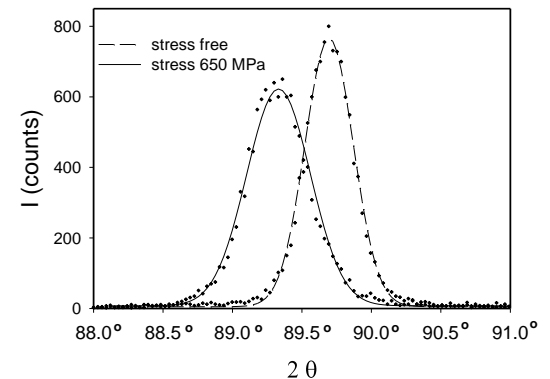
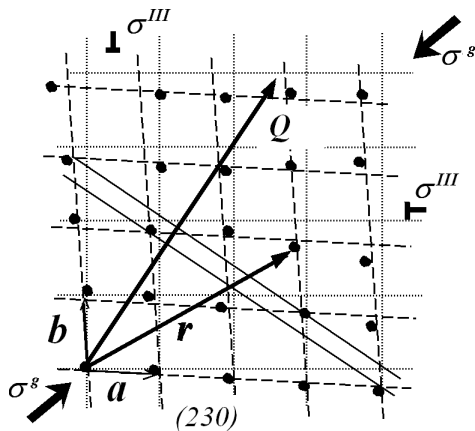


Metodologia pomiarów

Odształcenia sieci krystalicznej i naprężenia

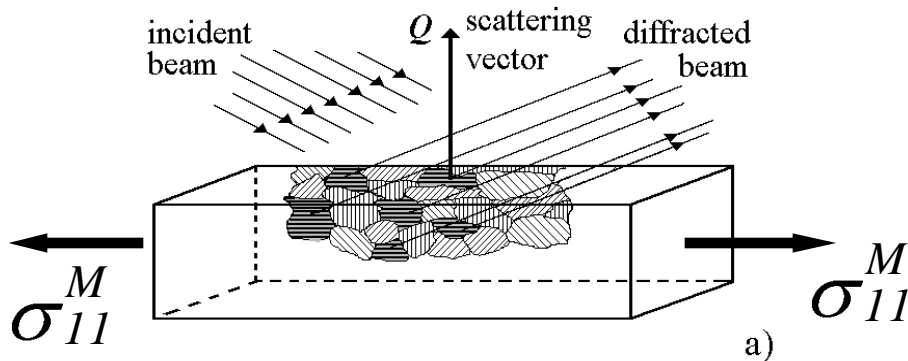
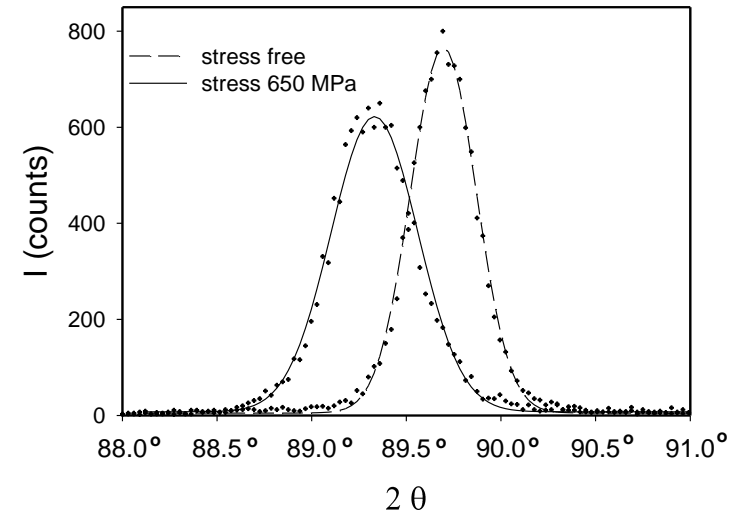
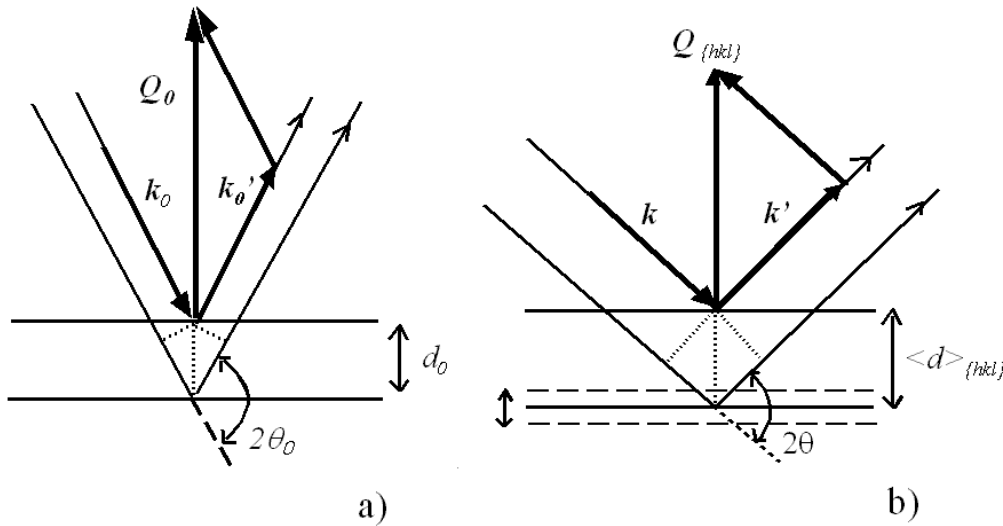


Promieniowanie rentgenowskie



Promieniowanie neutronowe

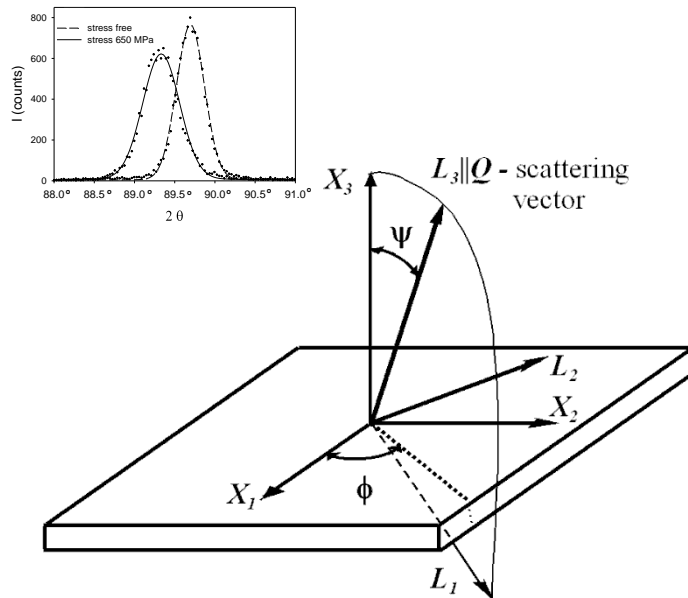
Pomiar dyfrakcyjny odkształceń sieci krystalicznej - idea



$$\langle \varepsilon \rangle_{hkl} = \frac{\langle d \rangle_{hkl} - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0}$$

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

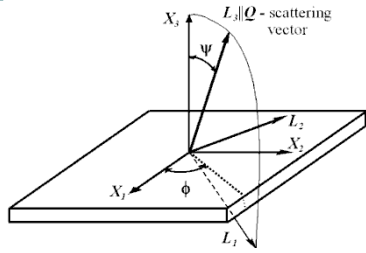
Jak wyznaczyć naprężenia ?



$$\langle \varepsilon(\varphi, \psi) \rangle_{hkl} = F_{ij}(hkl, \varphi, \psi) \sigma_{ij}^I$$

$F_{ij}(hkl, \varphi, \psi)$ dyfrakcyjne stałe sprężyste

Najprostszy przypadek - próbka bez tekstury



dla $\varphi=0^\circ$:

$$\langle d(\psi, \varphi) \rangle_{hkl} = \frac{1}{2} s_2 d_{hkl}^0 \sigma_{11} \sin^2 \psi + s_1 d_{hkl}^0 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + d_{hkl}^0$$

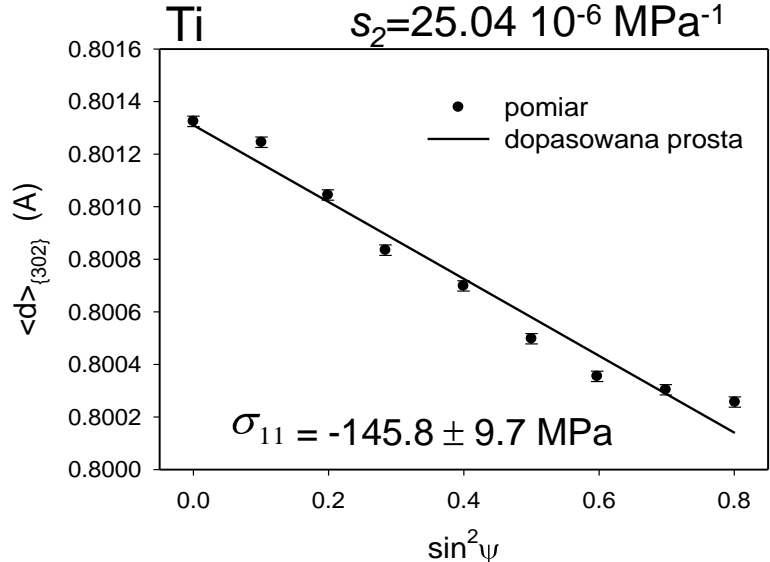
czyli:

$$\langle d(\psi, \varphi) \rangle_{hkl} = a \sin^2 \psi + b$$

gdzie:

$$a = \frac{1}{2} s_2 \sigma_{11} d_{\{hkl\}}^0$$

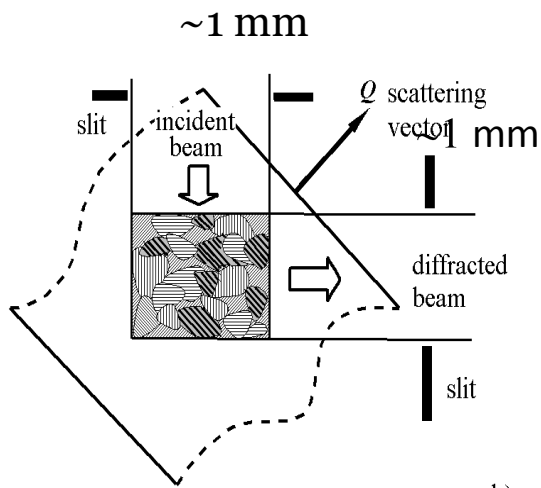
$$\sigma_{11} = \frac{2a}{s_2 d_{\{hkl\}}^0}$$



z niepewnością pomiaru:

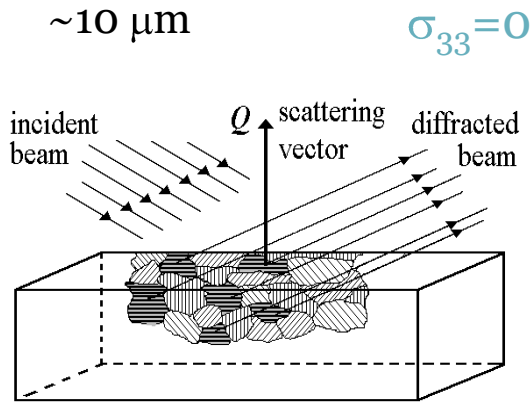
$$\Delta \sigma_{11} = \frac{2a}{d_{\{hkl\}}^0 s_2} \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d_{\{hkl\}}^0}{d_{\{hkl\}}^0}\right)^2}$$

Objętość próbkowania



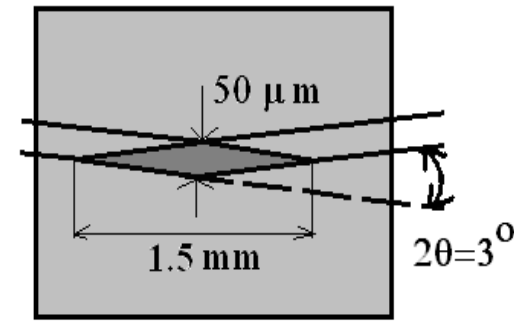
Promieniowanie neutronowe

b)



Promieniowanie rentgenowskie

a)



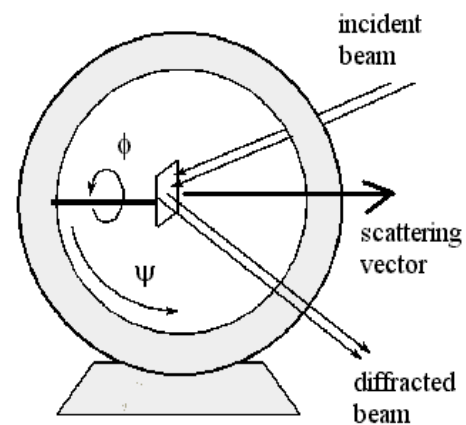
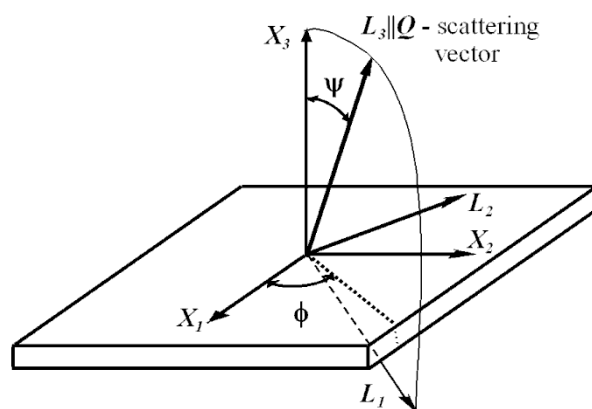
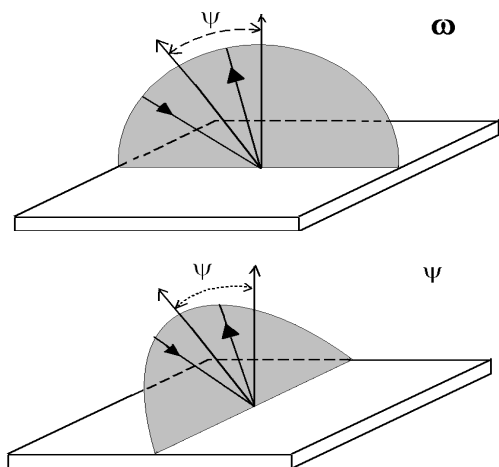
Promieniowanie synchrotronowe

	NEUTRONS $\lambda=1.29 \text{ \AA}$ ($E \approx 50 \text{ meV}$)	X- RAY $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ CuK α ($E \approx 8 \text{ keV}$)	SYNCHROTRON $\lambda=0.15 \text{ \AA}$ ($E \approx 80 \text{ keV}$)
ELEMENT	(mm)	(mm)	(mm)
Al	70.5	0.5×10^{-1}	15
Fe	6.2	0.29×10^{-2}	1.8
Ni	3.7	0.17×10^{-2}	1.4
W	6.6	0.21×10^{-2}	1

ABSORPCJA 50%

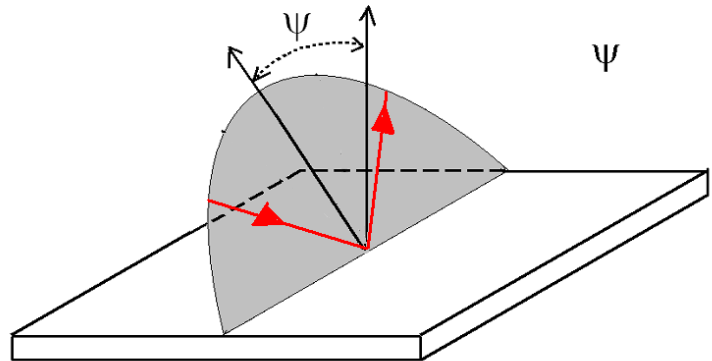
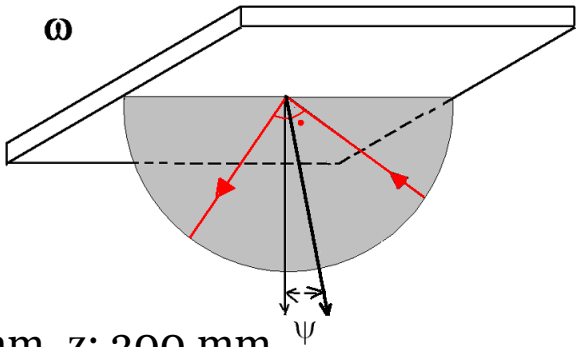
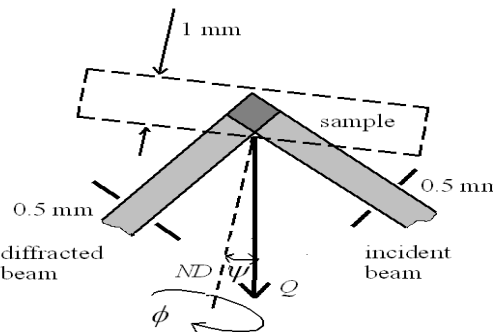
Techniki pomiarowe z użyciem różnych rodzajów promieniowania

Promieniowanie rentgenowskie - pomiary powierzchniowe

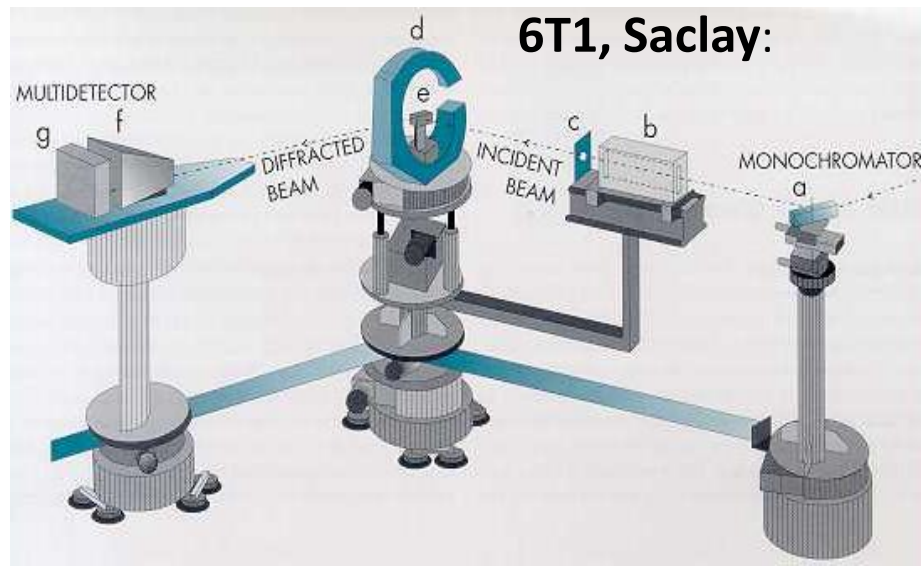
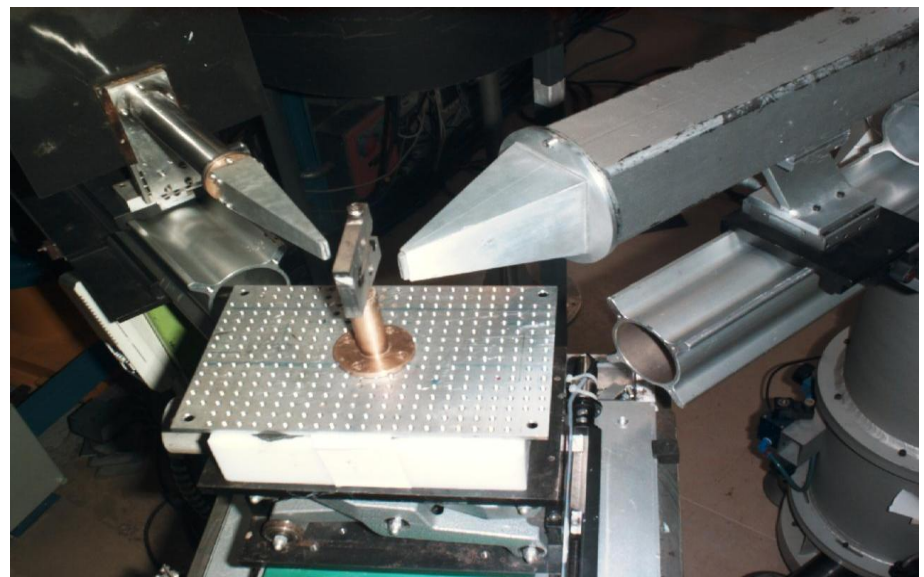


Promieniowanie neutronowe

Geometria omega

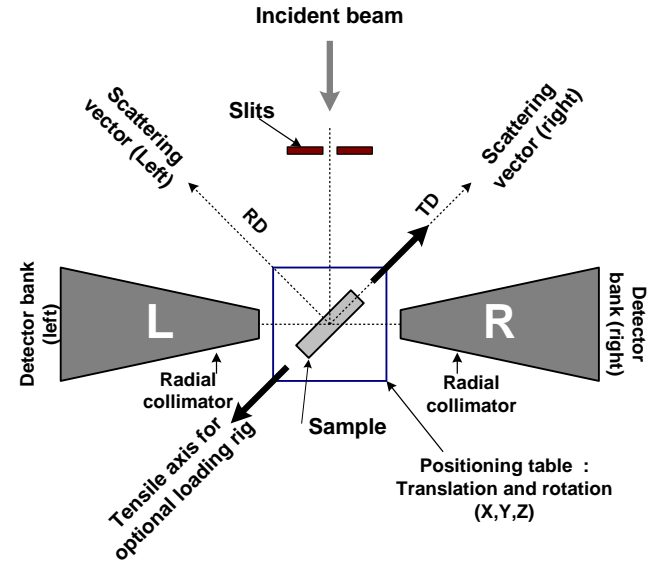
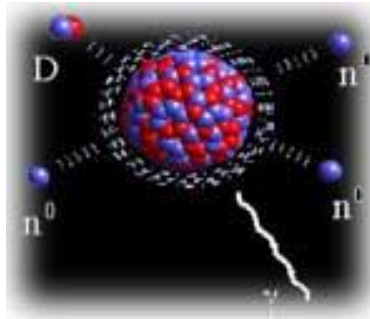
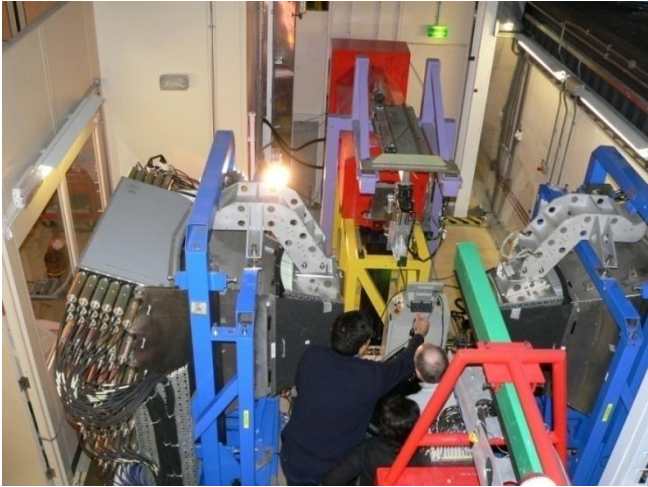


G5.2 Saclay: x, y : +/-75 mm, z: 300 mm
 (precyzja 0.001 mm) masa próbki: 500 kg



Promieniowanie neutronowe

Źródło spalacyjne

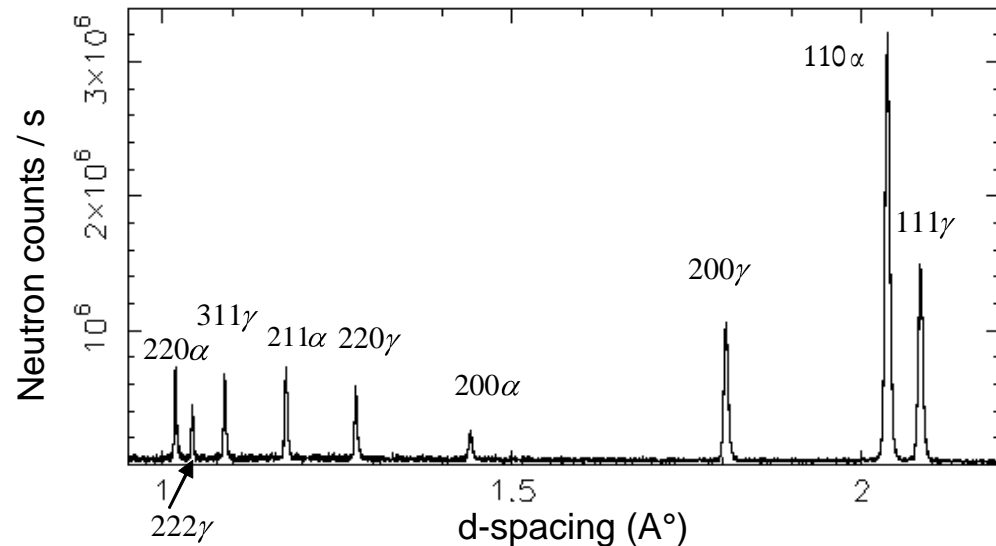


Time of flight (TOF)

$$\lambda = \frac{h}{m_n v} = \frac{ht}{m_n L}$$

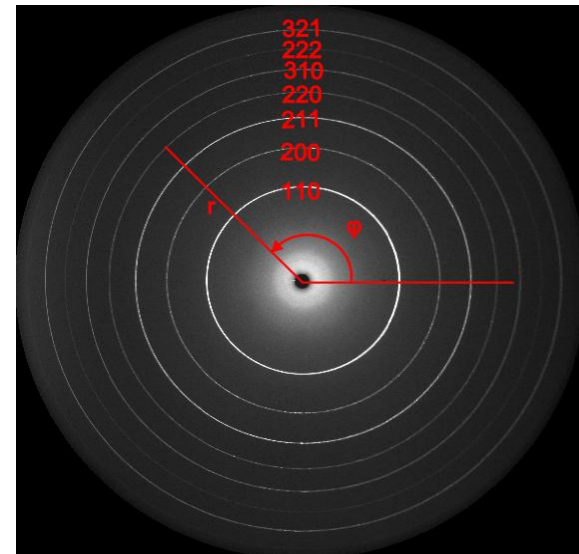
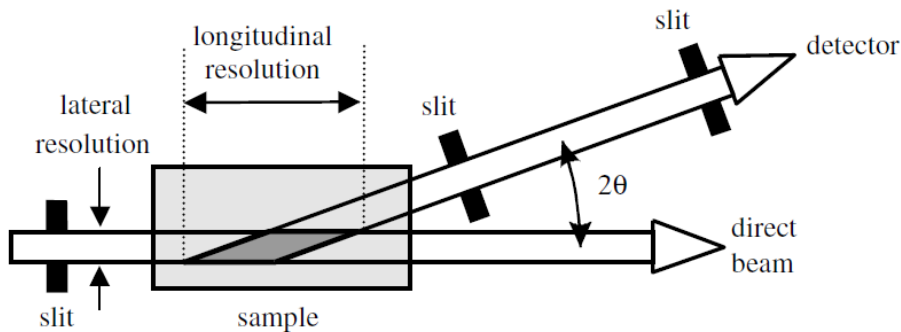
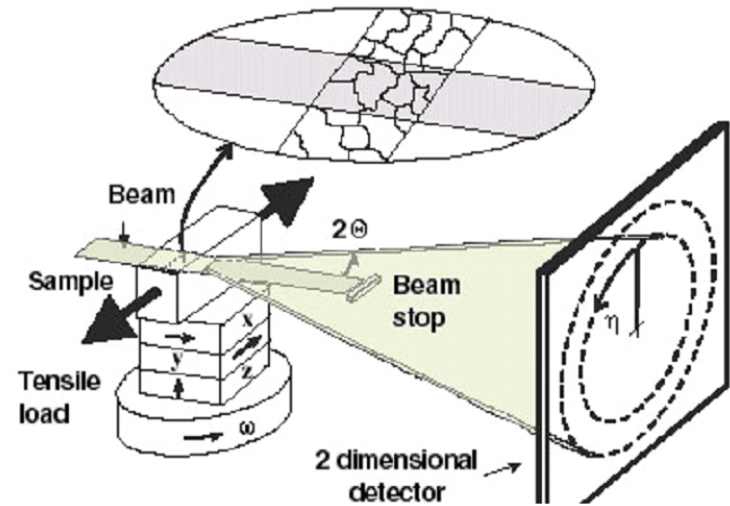
$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

$$2\theta = 90^\circ$$



Promieniowanie synchrotronowe ESRF

- Wysokoenergetyczne promieniowanie synchrotronowe (90keV)
- Tryb transmisyjny ($2\Theta=1,8^\circ-6^\circ$)
- Krótki czas akwizycji (kilka sekund)

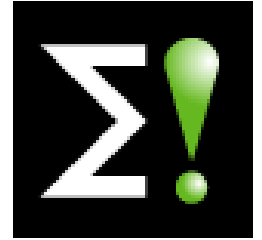


Uzyskane wyniki

Moje wcześniejsze prace

EUREKA! IMPERJA

2007 - 2011

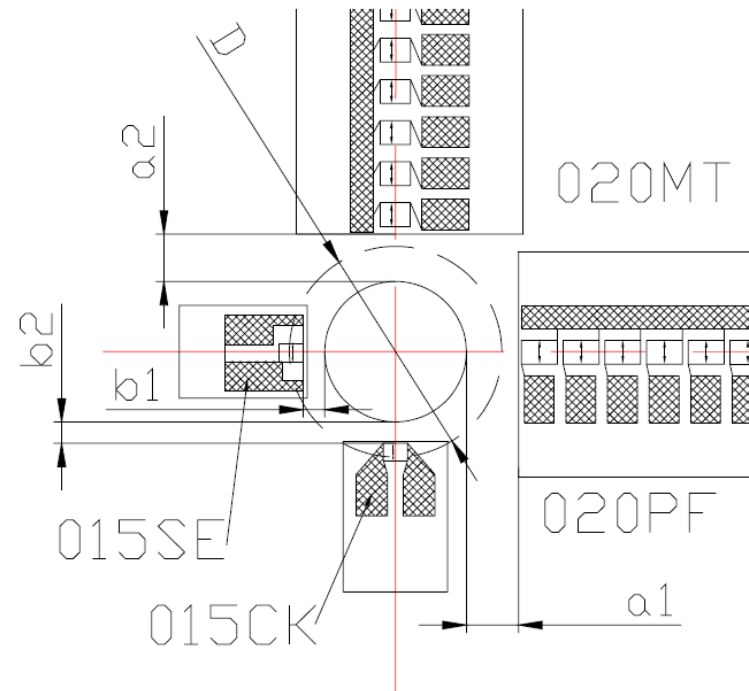
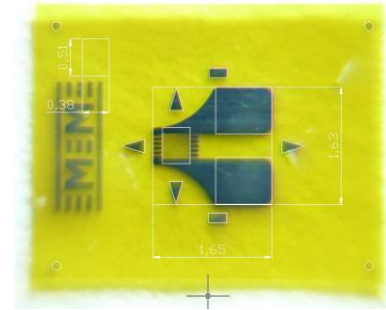
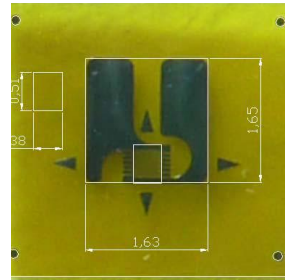
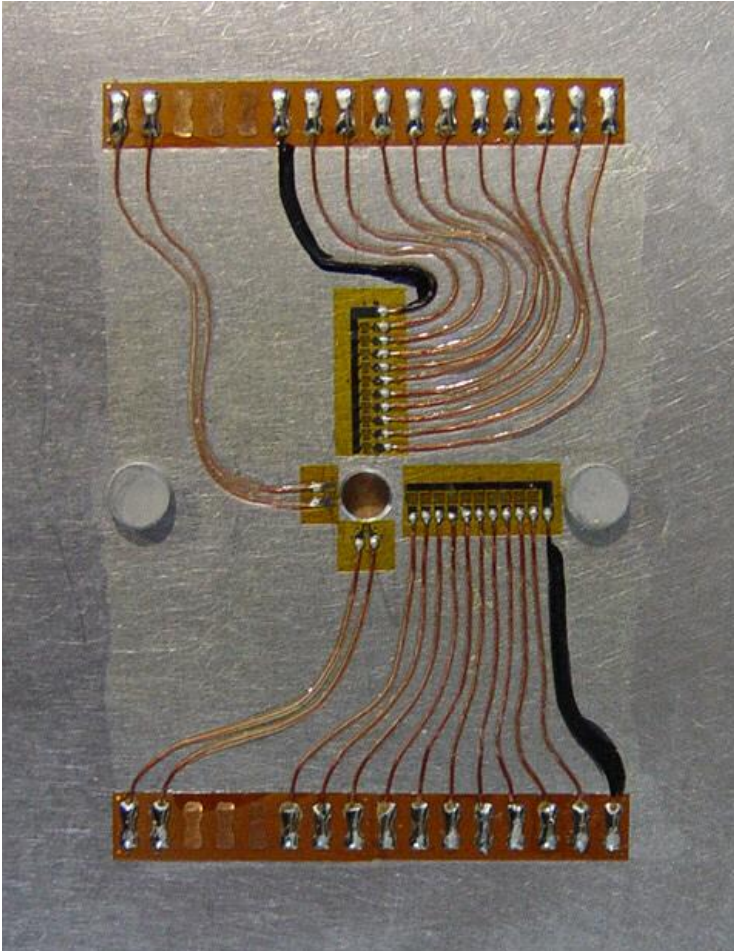


IMPROVING THE FATIGUE PERFORMANCE OF RIVETED JOINTS IN AIRFRAMES

- Cel: poprawa trwałości zmęczeniowej połączeń nitowych poprzez:
 - Wydłużenie czasu eksploatacji
 - Mniejszą liczbę inspekcji
 - Zmniejszenie kosztów operacyjnych konstrukcji lotniczych
- Środki:
 - Zbadanie i udoskonalenie procesu nitowania
 - Udoskonalenie metod przewidywania trwałości zmęczeniowej

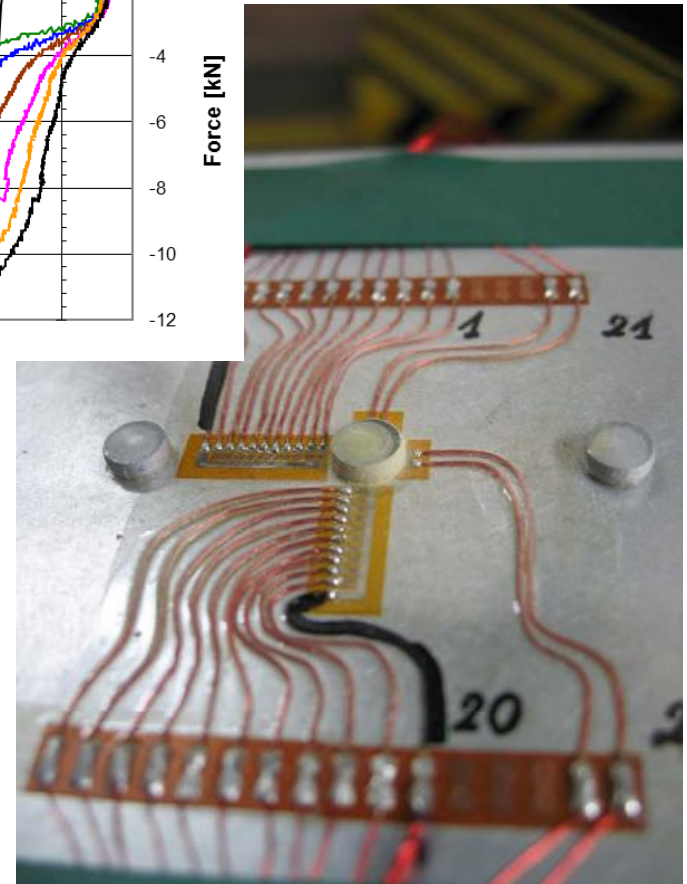
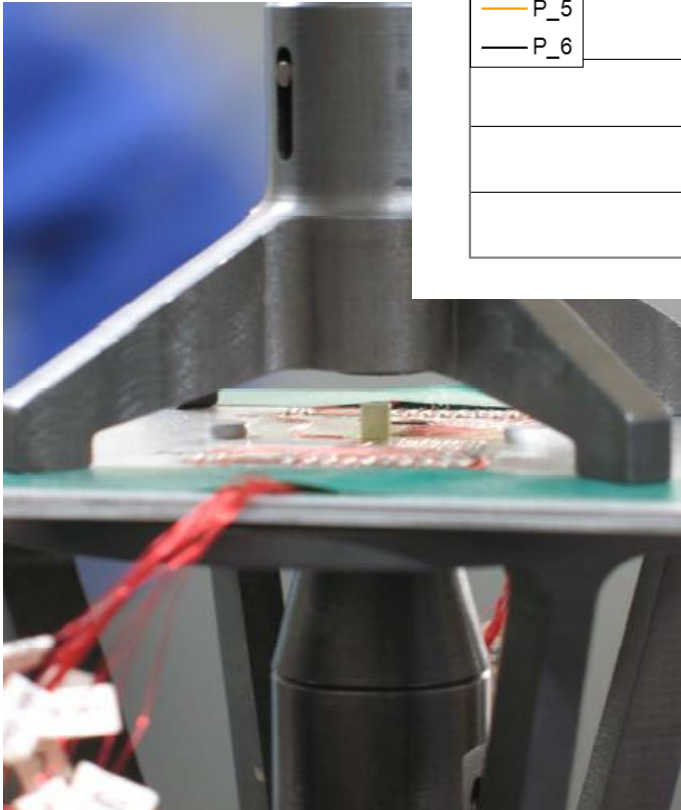
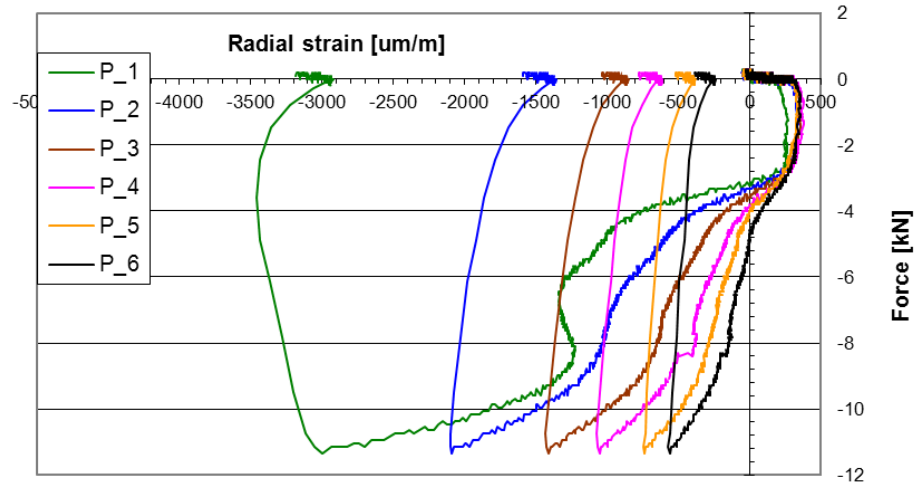
EUREKA! IMPERJA

Pomiar gradientu naprężeń wokół nitów - tensometria



EUREKA! IMPERJA

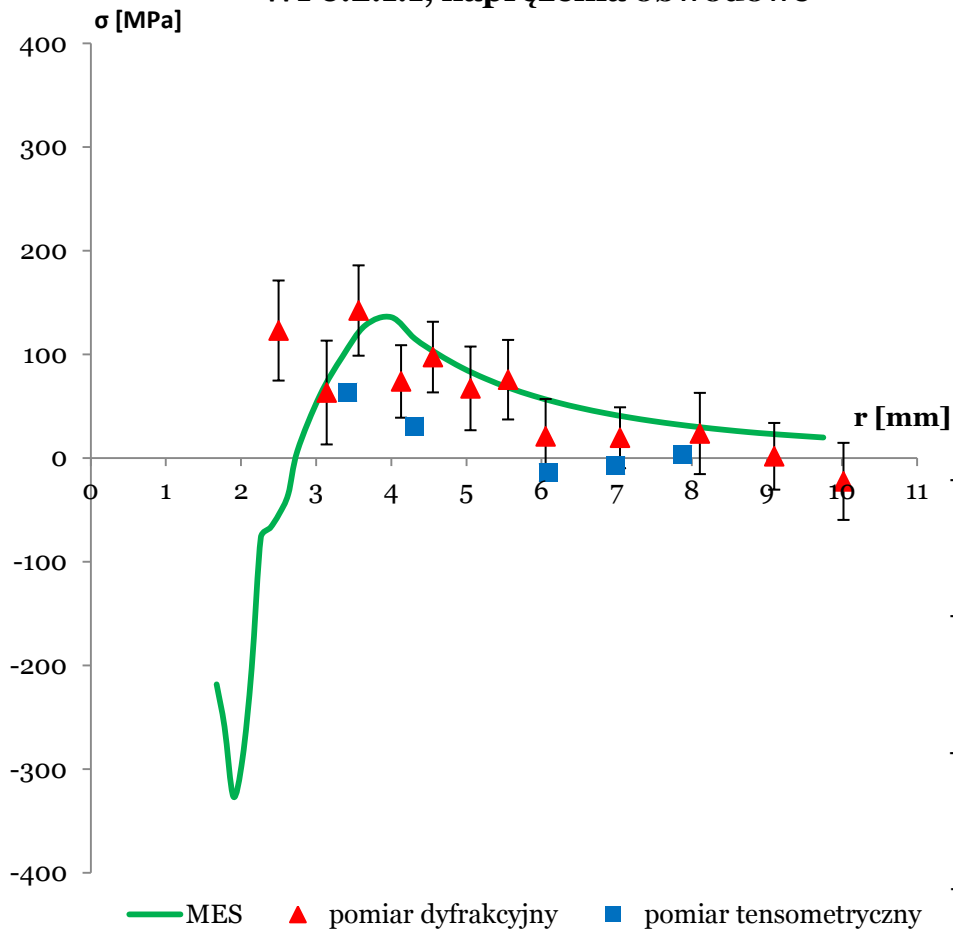
Pomiar gradientu naprężeń wokół nitów - tensometria



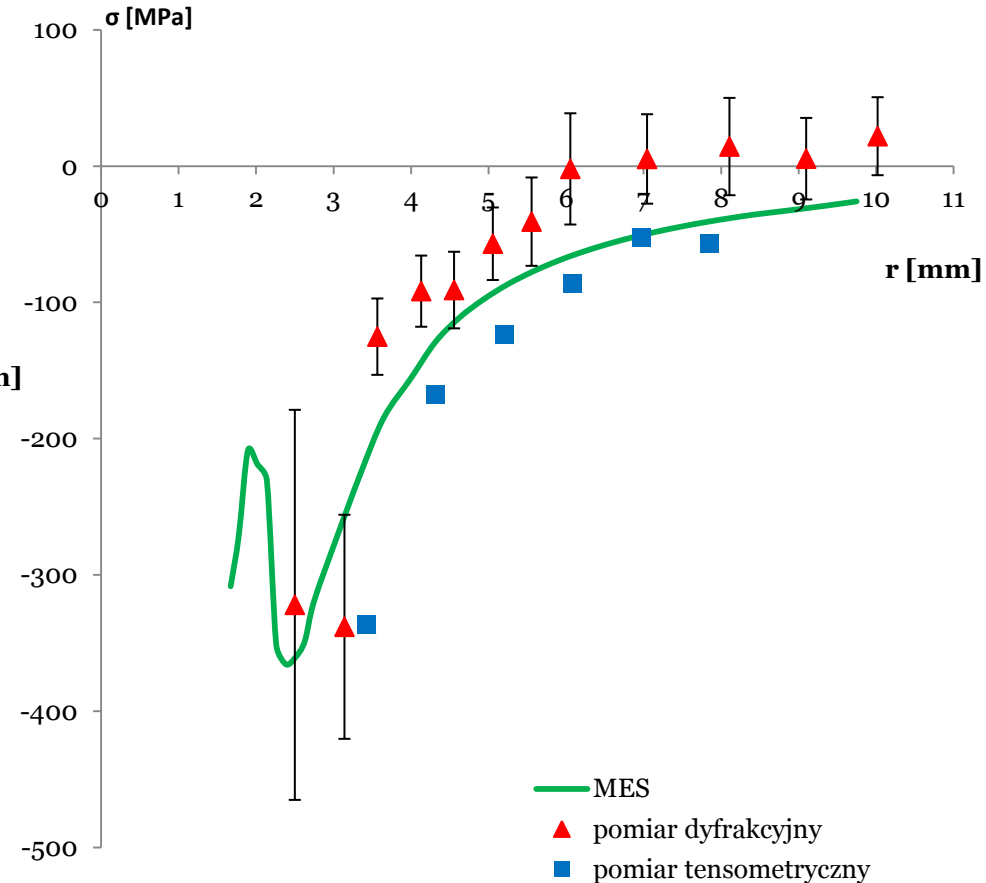
EUREKA! IMPERJA

Pomiar gradientu naprężeń wokół nitów - nit z łbem wpuszczanym bez kompensatora

WP6.2.1.1, naprężenia obwodowe



WP6.2.1.1, naprężenia promieniowe



Grant realizowany pod opieką promotora dr hab. A. Baczmańskiego

Grant NCN:

PRELUDIUM(VIII.2012)

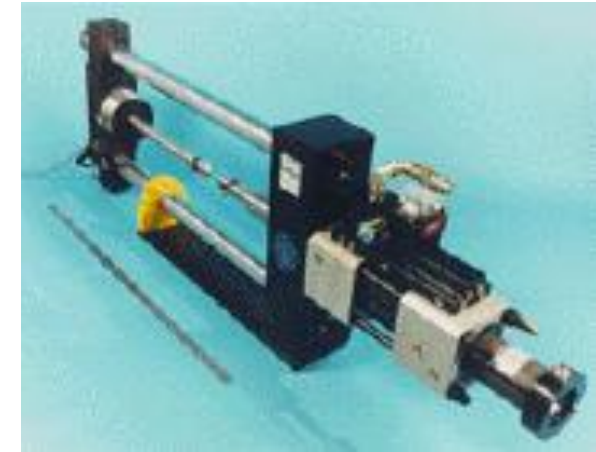
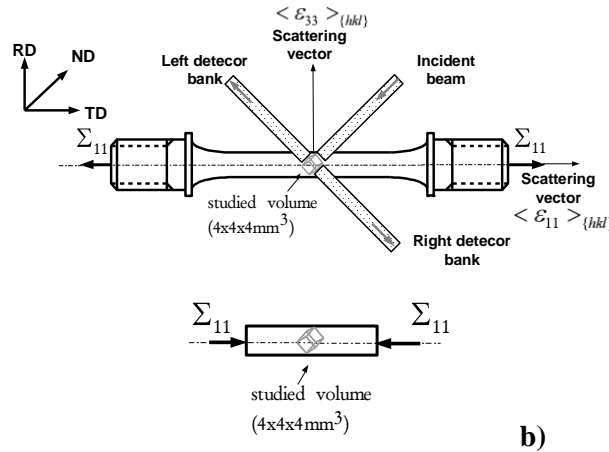
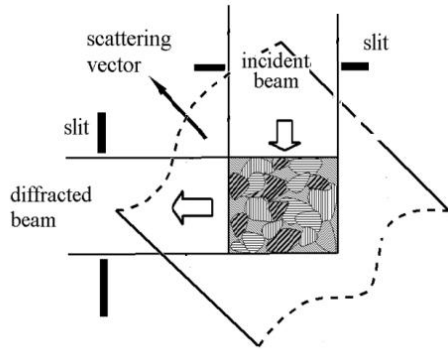
finansowanie projektów badawczych, realizowanych przez osoby
rozpoczynające karierę naukową nieposiadające stopnia naukowego doktora

**Badanie własności mikromechanicznych polikrystalicznych materiałów
dwufazowych z wykorzystaniem metod dyfrakcyjnych oraz modeli
krystalograficznych**

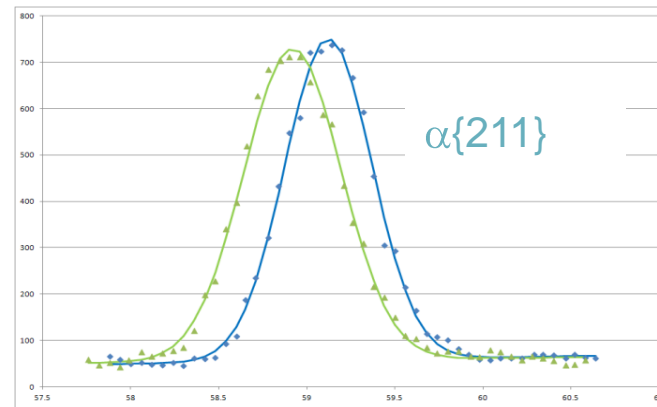
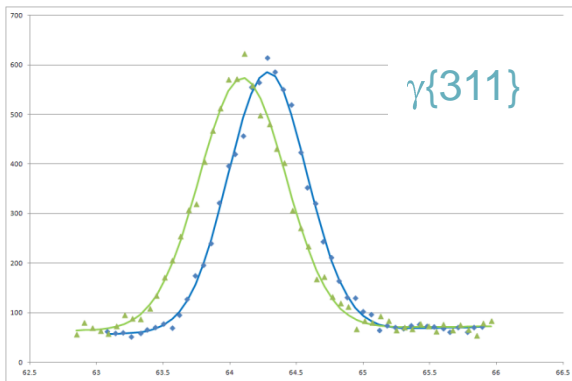
Eksperymenty w ISIS, LLB(neutrony) ESRF(synchrotron)

- Główne cele pracy doktorskiej oraz grantu NCN
 - Badanie własności mikromechanicznych dla ziaren w próbkach poddanych odkształceniom plastycznym
 - Wyznaczenie tensora lokalizacji naprężeń w materiale polikrystalicznym podczas obciążenia mechanicznego
 - Badanie efektów mechanicznych mikrozniszczeń powstających podczas odkształceń plastycznych w materiałach polikrystalicznych
- Badanie materiały:
 - Stal dwufazowa (ferryt i austenit) – badania zrealizowane,
 - Kompozyty: Al/SiC, Ti/TiC (w planie)

Idea pomiaru



Pomiar dyfrakcyjny



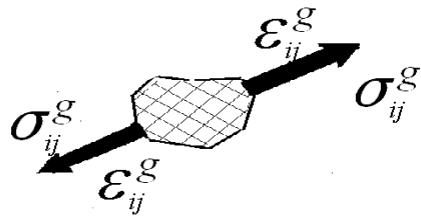
$$n\lambda = 2 \langle d \rangle_{\{hkl\}} \sin \theta$$

$$\langle \epsilon \rangle_{hkl} = \frac{\langle d \rangle_{hkl} - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0}$$

Model samouzgodniony

Własności mechaniczne w skali ziaren podczas deformacji elastoplastycznej

Odształcenie w zakresie elastycznym:

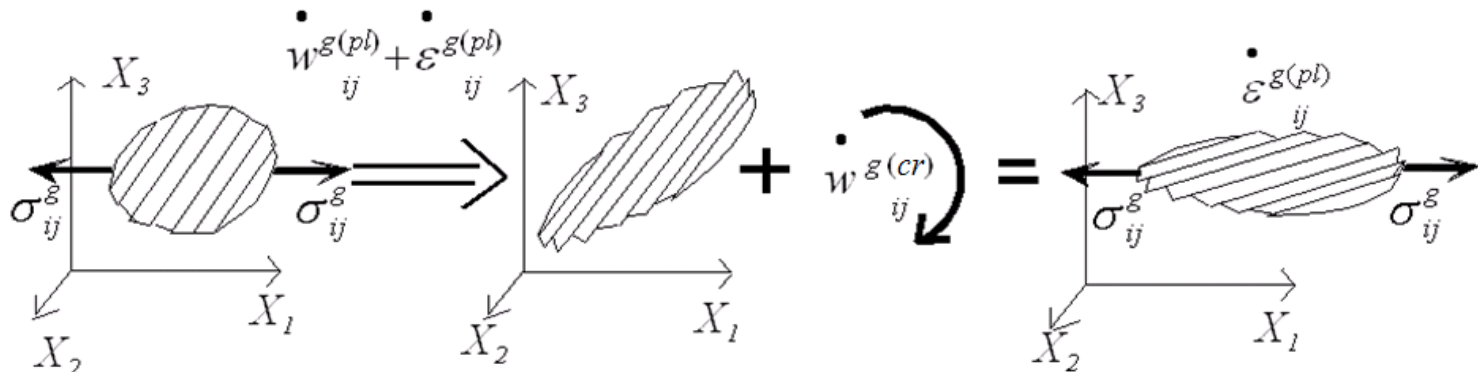


$$\epsilon_{ij}^{g(el)}$$

$$\sigma_{ij}^g = C_{ijkl}^g \epsilon_{kl}^{g(el)}$$

Odształcenie w zakresie elastoplastycznym:

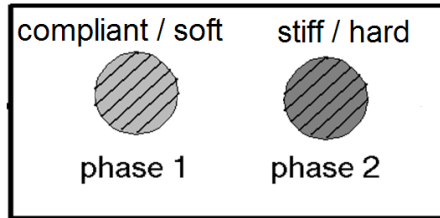
$$\epsilon_{ij}^g = \epsilon_{ij}^{g(el)} + \epsilon_{ij}^{g(pl)}$$



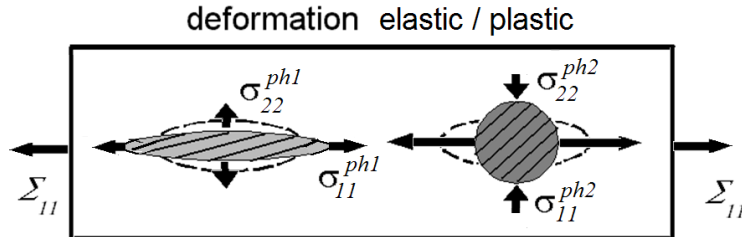
Chcemy wyznaczyć τ - krytyczne naprężenia ścinające potrzebne do uaktywnienia poślizgów oraz zależność τ od stopnia deformacji (dla ziaren lub grup ziaren)

Model samouzgodniony

Tensor lokalizacji naprężeń / odkształceń



$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^g = \mathbf{A}_{ijkl}^g \Delta E_{kl} \quad \Delta \boldsymbol{\sigma}_{ij}^g = \mathbf{B}_{ijkl}^g \Delta \Sigma_{kl}$$



Chcemy wyznaczyć tensor lokalizacji naprężeń \mathbf{B}

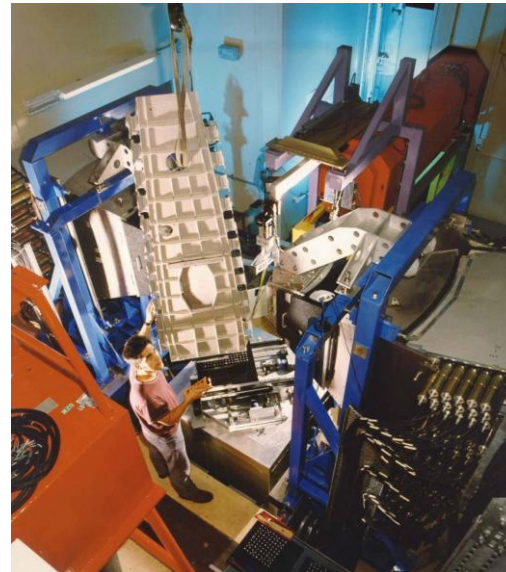
Czy możliwe jest zaobserwowanie efektów mechanicznych zniszczeń zachodzących w ziarnach?

Wcześniejsze badania w ISIS i LLB

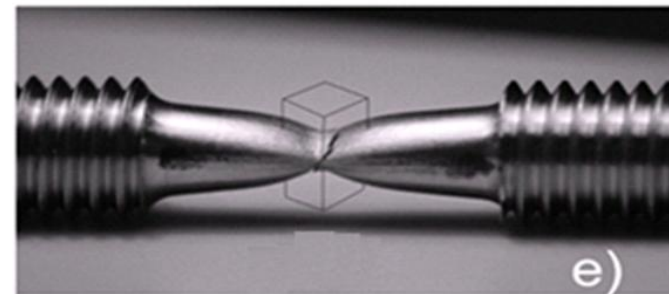
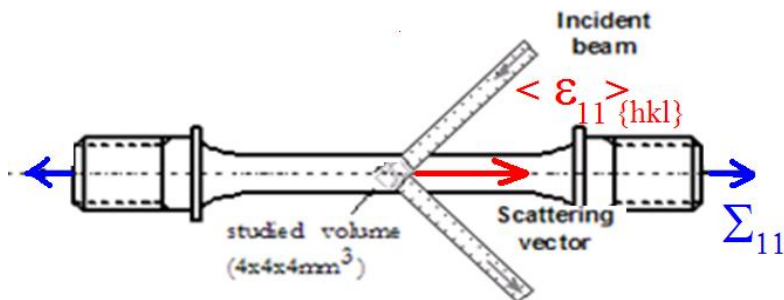
prace doktorskie: Rim Dakhlaoui (2006, ENSAM, Paris) oraz Léa Le Joncour (2011, Uniwersytet w Troyes, Francja)



G5.2, LLB, Saclay (Francja) – reaktor jądrowy; promieniowanie neutronowe

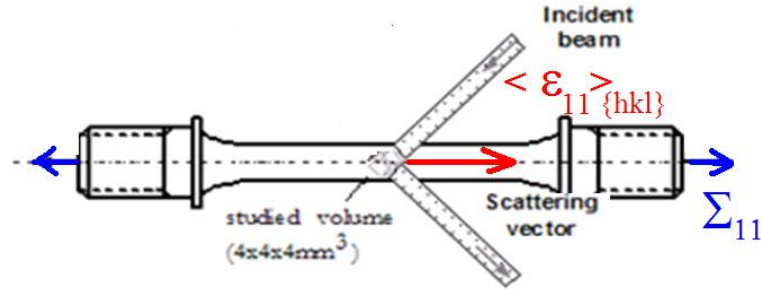


ISIS, Engine-X-
promieniowanie
neutronowe;
źródło spalacyjne

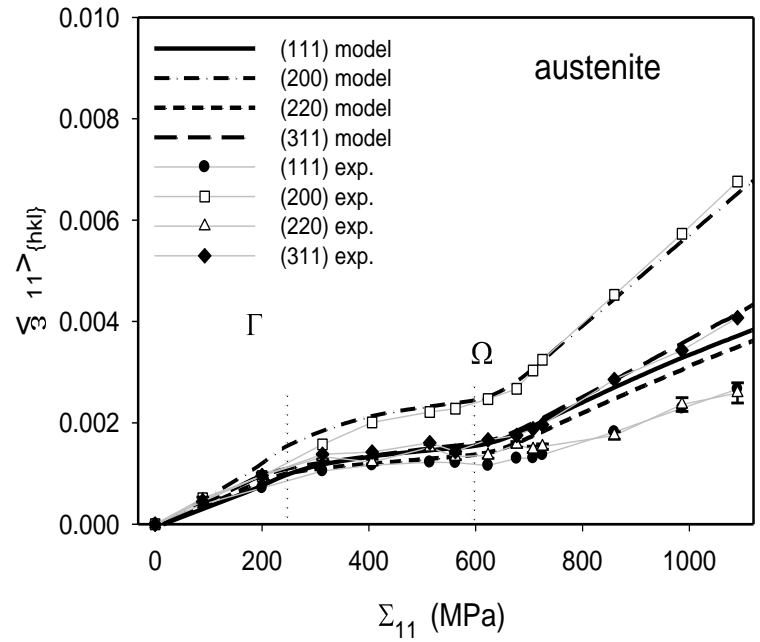
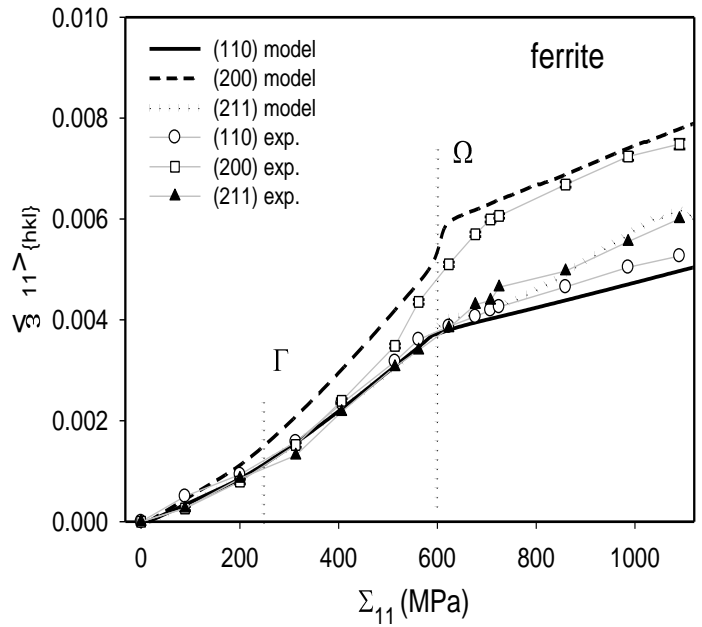


Mikromechaniczne własności stali dwufazowej

- Pomiar „in situ” – jednoosiowe rozciąganie
- TOF na ENGINE-X w ISIS



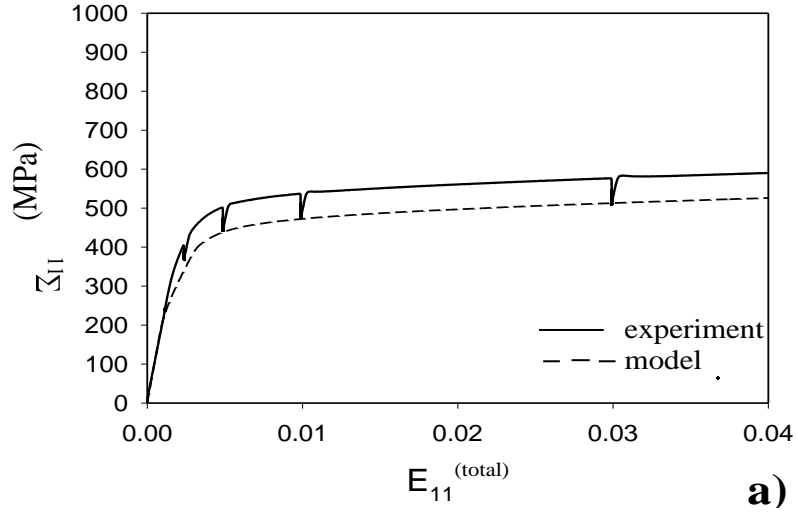
Γ - plastyczność austenitu (FCC)
 Ω - plastyczność ferrytu (BCC)



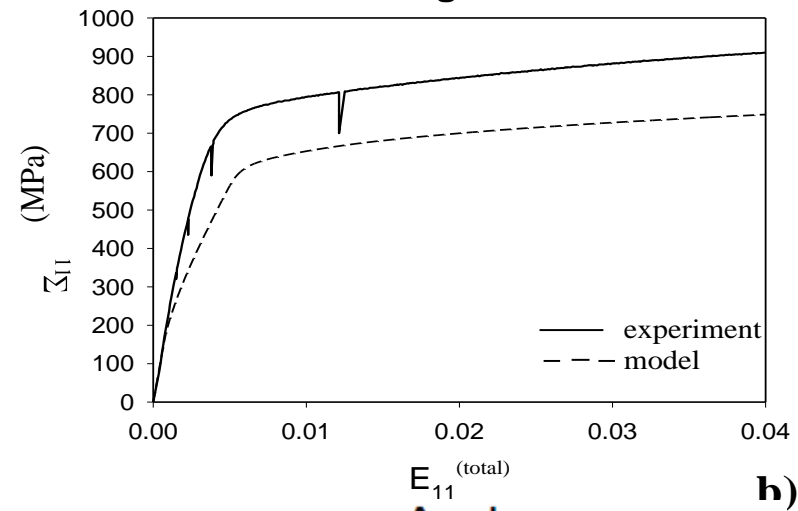
A. Baczański and C. Braham, Acta Materialia, **59**, 1133-1142 (2004)
 R. Dakhlou, A. Baczański, C. Braham, S. Wronski, K. Wierzbowski and E.C. Oliver, Acta Materialia, **54**, 5027-5039 (2006)

Mikromechaniczne własności stali dwufazowej- LLB neutrony(wpływ procesu termicznego)

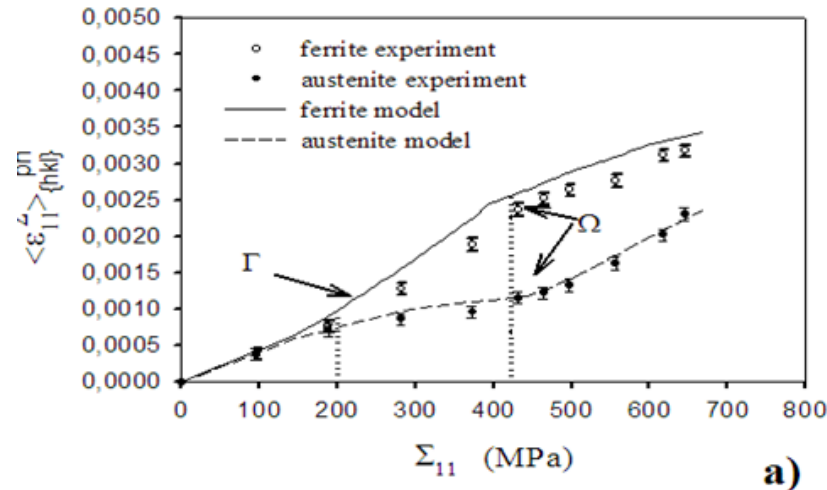
Quenched



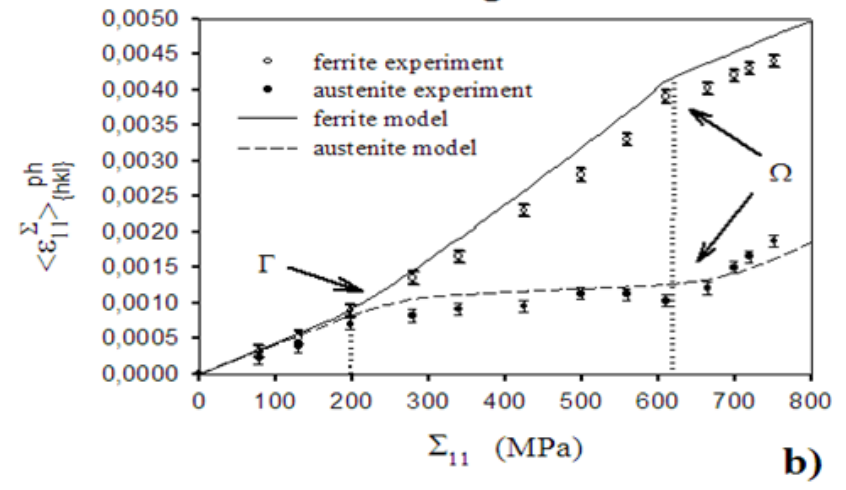
Aged



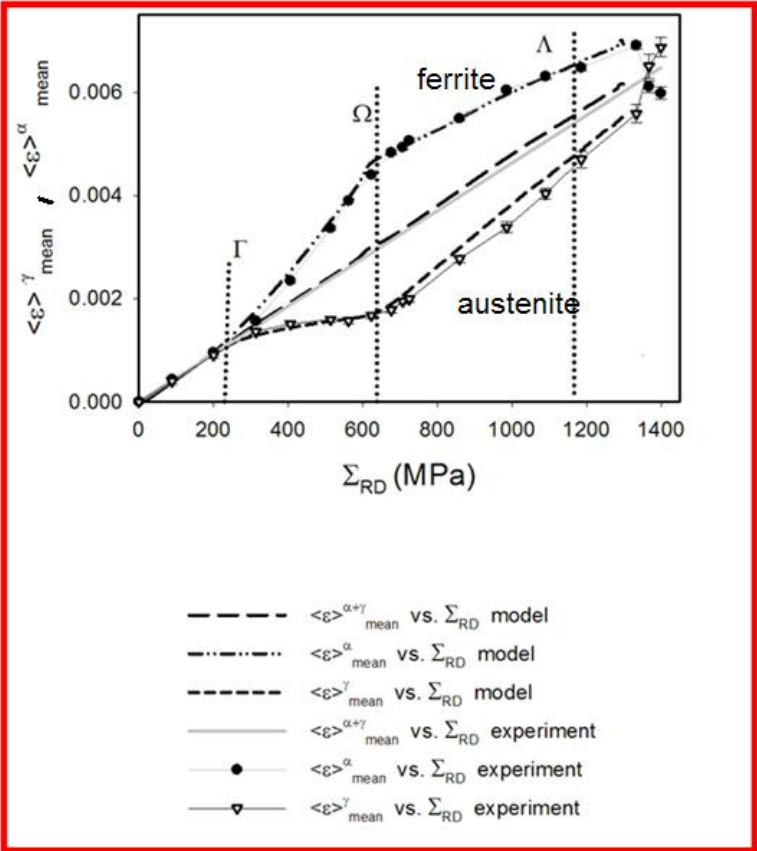
Quenched



Aged



Mikromechaniczne własności stali dwufazowej- ISIS neutrony



Powyżej punktu Λ widoczny efekt zniszczeń

Prawo Voce w modelu samouzgodnionym

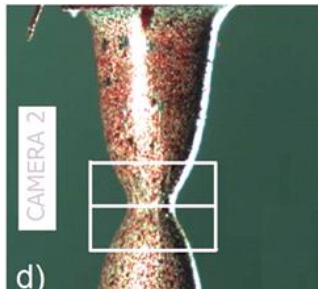
$$\tau^{gr} = \tau_0^{ph} + \left(\tau_1^{ph} + \theta_1^{ph} \xi^{gr} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{\theta_0^{ph}}{\tau_1^{ph}} \xi^{gr} \right) \right]$$

τ^{ph} – naprężenie krytyczne dla ziarna "gr" w funkcji sumy odkształceń ścinających w ziarnie " ξ^{gr} "

τ_0^{ph} – początkowe naprężenie krytyczne dla fazy "ph"

θ_0^{ph} - początkowe umocnienie dla fazy "ph"

τ_1^{ph} i θ_1^{ph} – opisują nieliniowość umocnienia

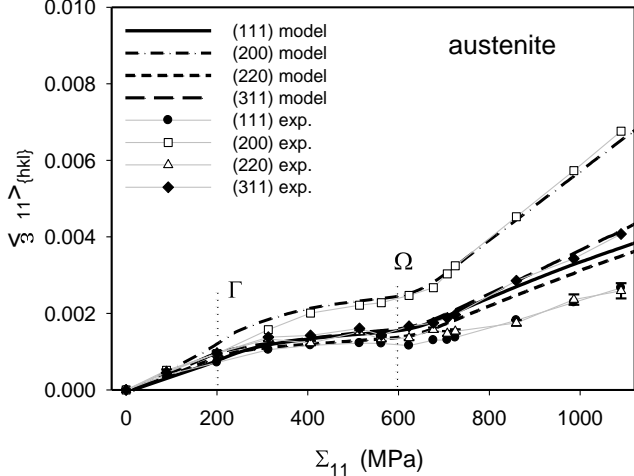
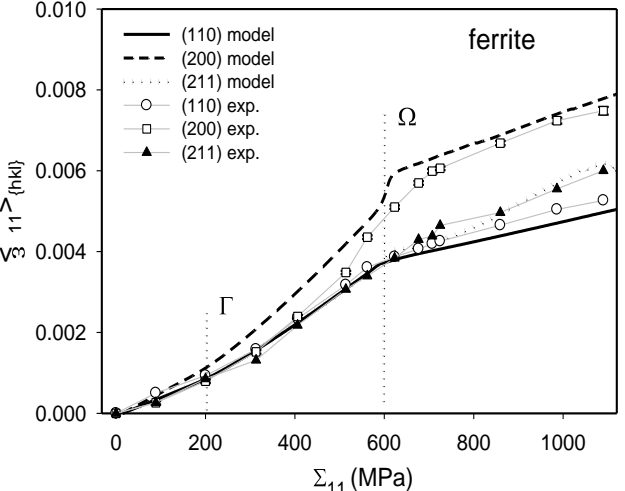


The parameters of plastic deformation (MPa)

Material		UR45N (quenched)	UR45N (aged)
$\tau_0^{(ph)}$ (MPa)	Austenite	140	140
	Ferrite	220	350
$\theta_0^{(ph)}$ (MPa)	Austenite	225	225
	Ferrite	110	110
$\tau_1^{(ph)}$ (MPa)	Austenite	Not	280
	Ferrite	adjusted	140
$\theta_1^{(ph)}$ (MPa)	Austenite		0.3
	Ferrite		0.1

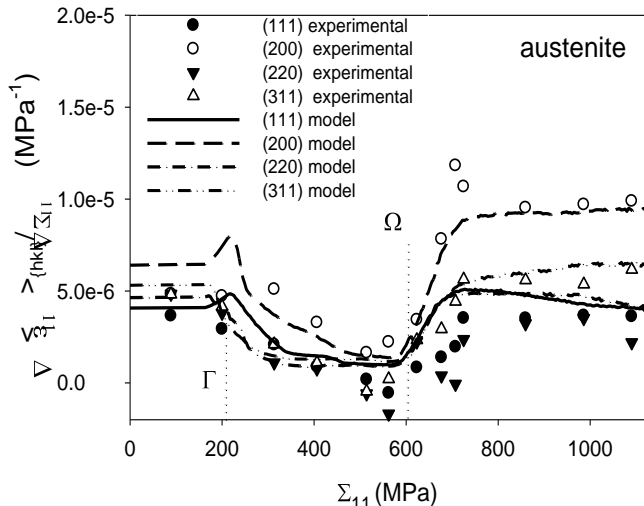
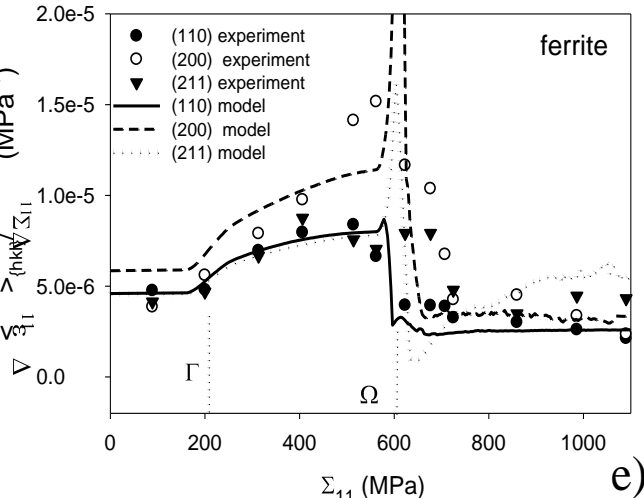
A. Baczanski, L. Le Joncour, B. Panicaud, M. Francois, C. Braham, B. A. M. Paradowska, S. Wroński, S. Amara and R. Chirone, Journal of Applied Crystallography, 44, (2011) 966-982.

Wyznaczanie tensora lokalizacji ISIS neutrony



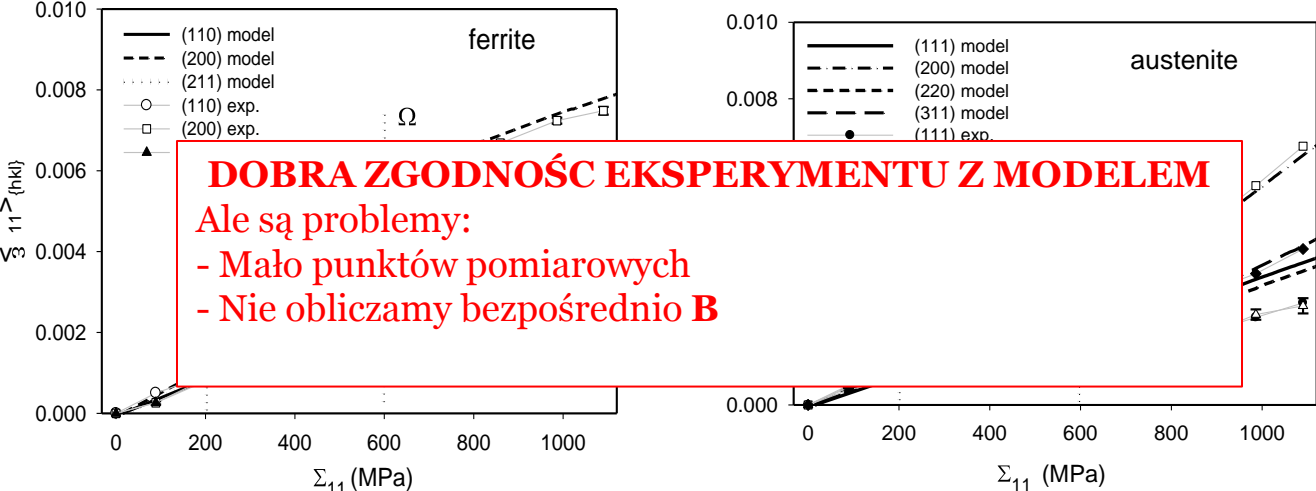
$$\Delta \sigma_{ij} = B_{ij11} \Delta \Sigma_{11}$$

Obliczamy iloraz różnicowy:



$$\frac{\langle s_{11ij} B_{ij11} \rangle_{\{hkl\}} = \Delta \langle \varepsilon_{11} \rangle_{\{hkl\}}}{\Delta \Sigma_{11}}$$

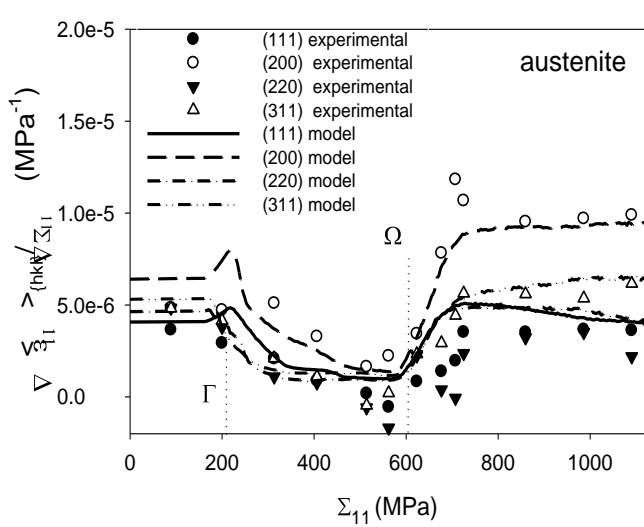
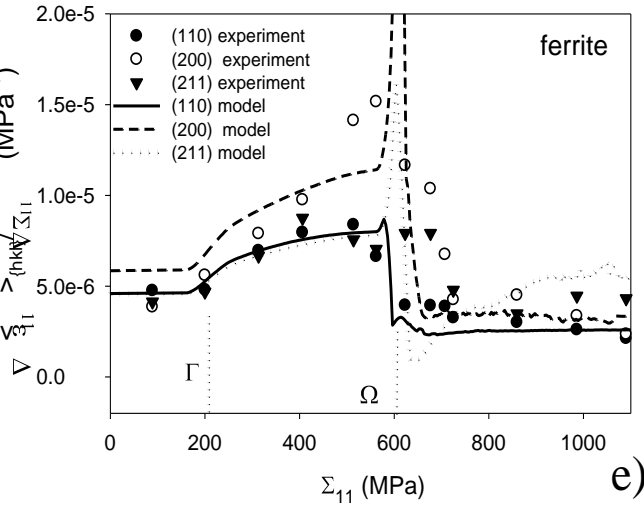
Wyznaczanie tensora lokalizacji ISIS neutrony



$$\Delta\sigma_{ij} = B_{ij11} \Delta\Sigma_{11}$$

Obliczamy iloraz różnicowy:

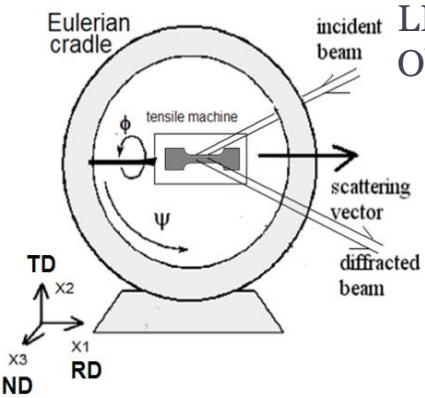
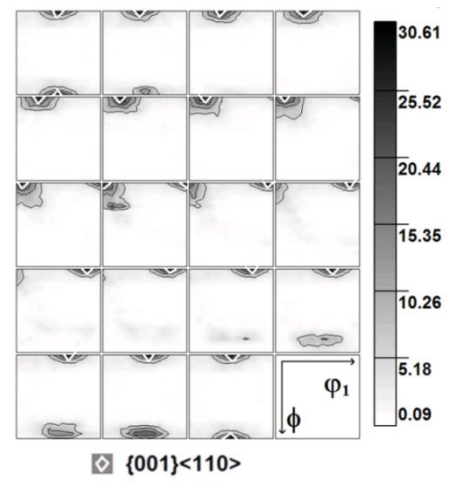
$$\frac{\langle s_{11ij} B_{ij11} \rangle_{\{hkl\}}}{\Delta\Sigma_{11}} =$$



Wyznaczanie tensora lokalizacji (LLB)

praca doktorska E. Gadalińska

LLB, Saclay, 6T1, neutrony, dyspersja $2\theta \lambda = 1.159 \text{ \AA}$
 Objętość próbkowania $10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$

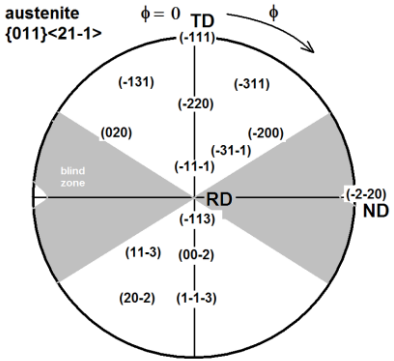
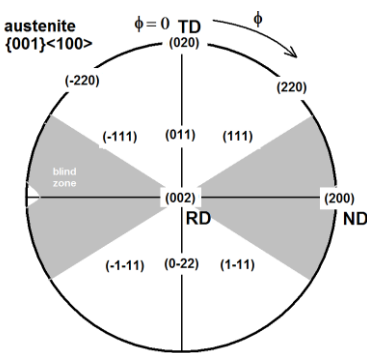
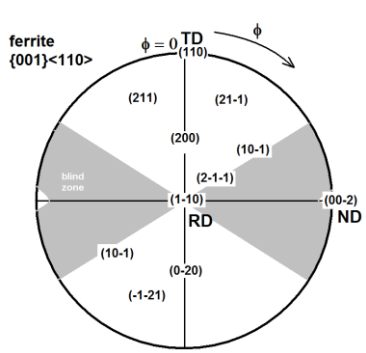
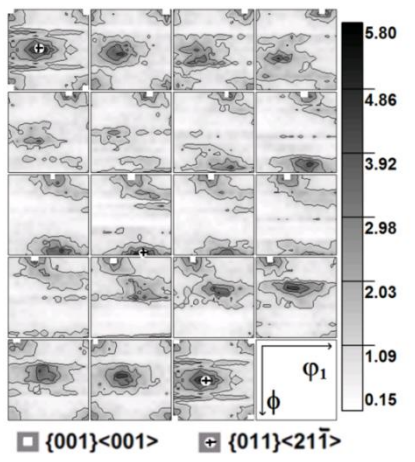


Metoda grup krystalitów

$$\langle \varepsilon(\varphi, \psi) \rangle_{\{hkl\}} = \gamma_{3i} \gamma_{3j} S_{ijkl}^g \sigma_{kl}^g$$

measured lattice strains direction cosines single crystal elastic constants stress for group of crystals

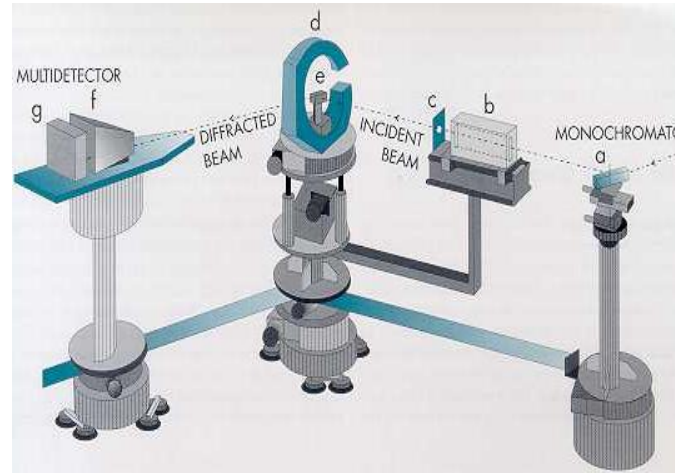
$$g \rightarrow \{uvw\} \langle mno \rangle$$



Korzyść: tensor naprężeń dla kilku orientacji
Problem: długi pomiar (jeden punkt kilkanaście godzin)

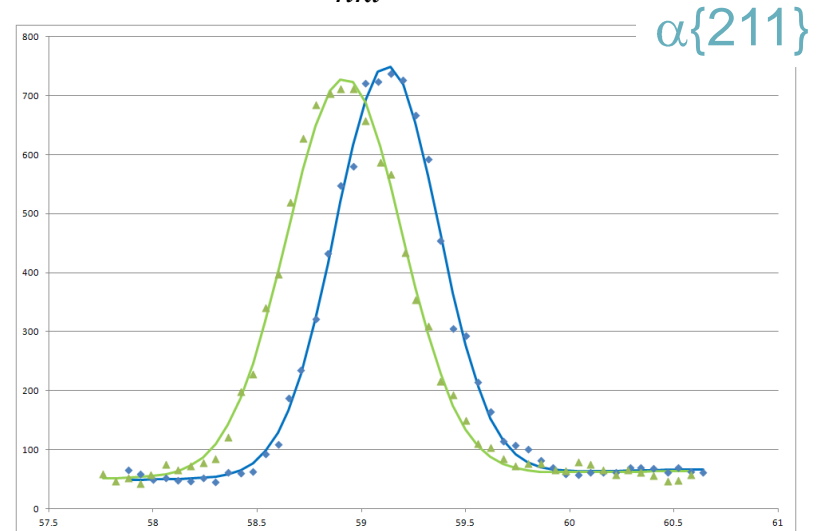
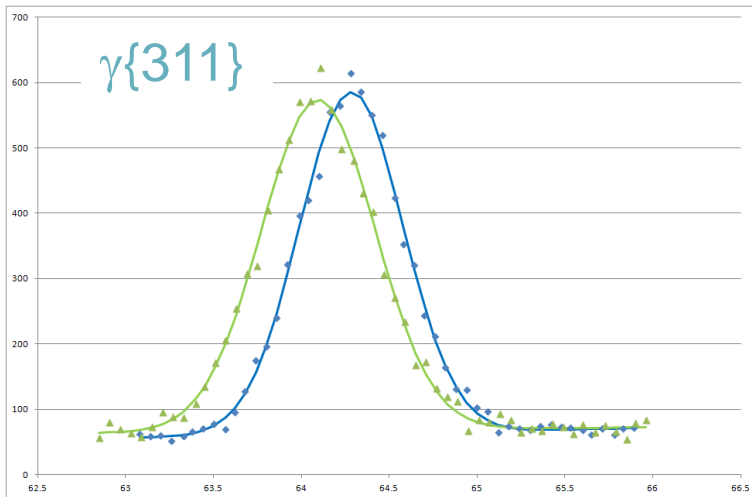
Wyznaczanie tensora lokalizacji (LLB) **praca doktorska**

E. Gadalińska

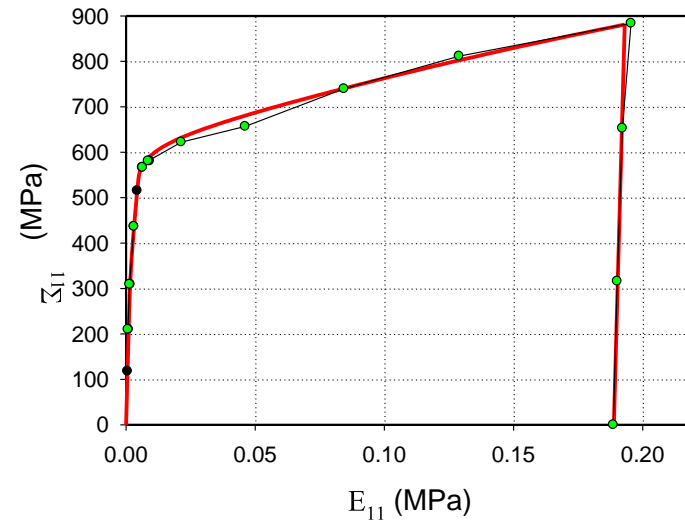
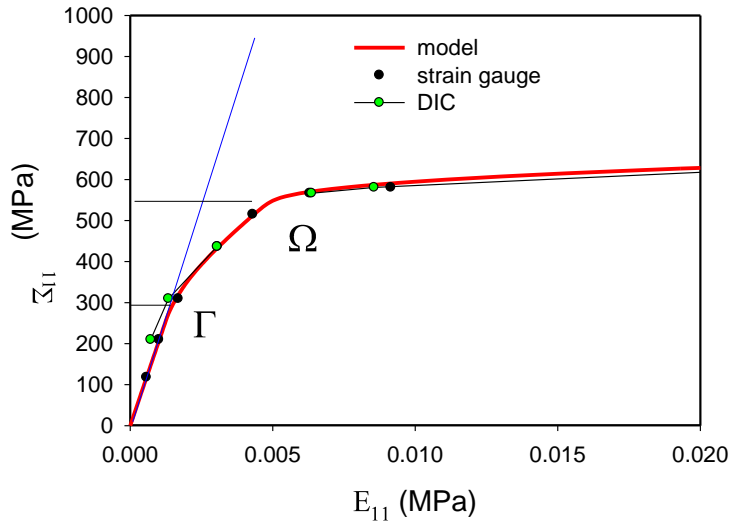


LLB, Saclay, 6T1, neutrons,
dyspersja $2\theta \lambda = 1.159 \text{ \AA}$
Objętość próbkowania $10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$



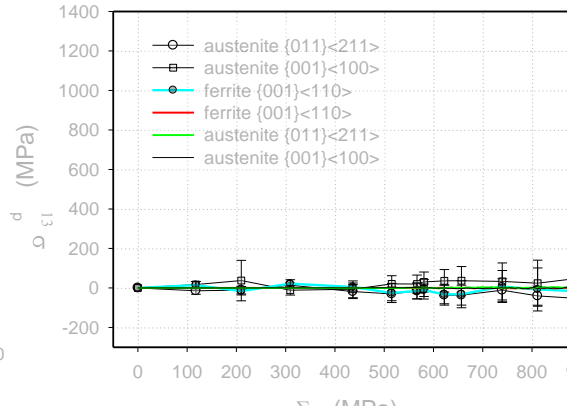
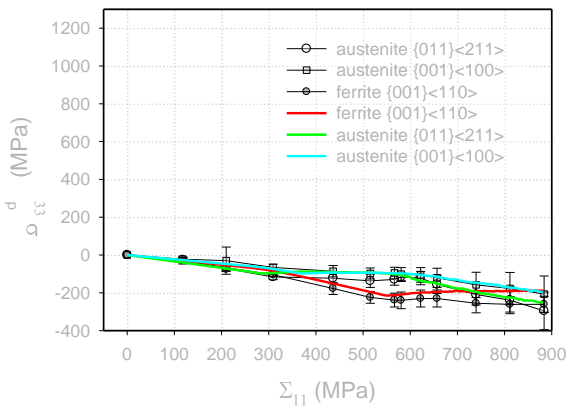
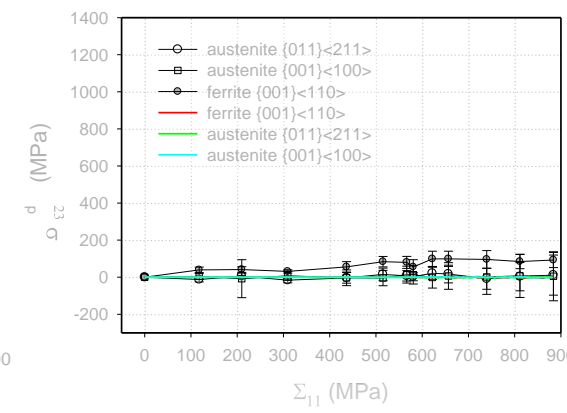
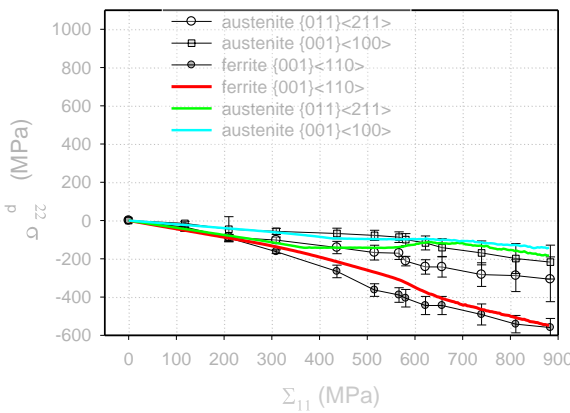
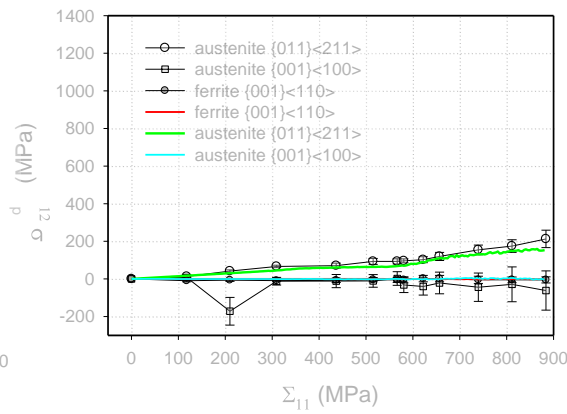
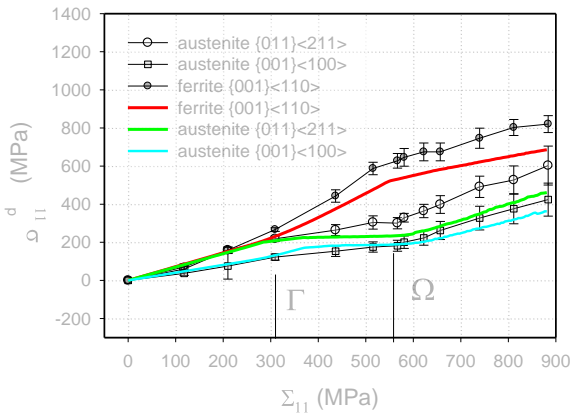
LLB- wyniki makromechaniczne (z użyciem metody DIC oraz tensometru)



$$\tau^{gr} = \tau_0^{ph} + \left(\tau_1^{ph} + \theta_1^{ph} \xi^{gr} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_0^{ph}}{\tau_1^{ph}} \xi^{gr} \right) \right]$$

Material:		UR45N (quenched)
$\tau_0^{(ph)}$ (MPa)	austenite	110
	ferrite	350
$\theta_0^{(ph)}$ (MPa)	austenite	280
	ferrite	140
$\tau_1^{(ph)}$ (MPa)	austenite	not adjusted
	ferrite	
$\theta_1^{(ph)}$ (MPa)	austenite	not adjusted
	ferrite	

Naprężenia dewiatoryczne



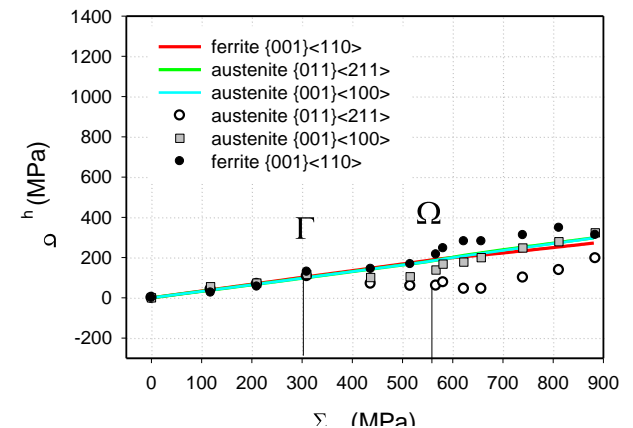
Metoda grup krystalitowa model samouzgodniony porównanie

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^d & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}^d & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33}^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma^h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^h \end{bmatrix}$$

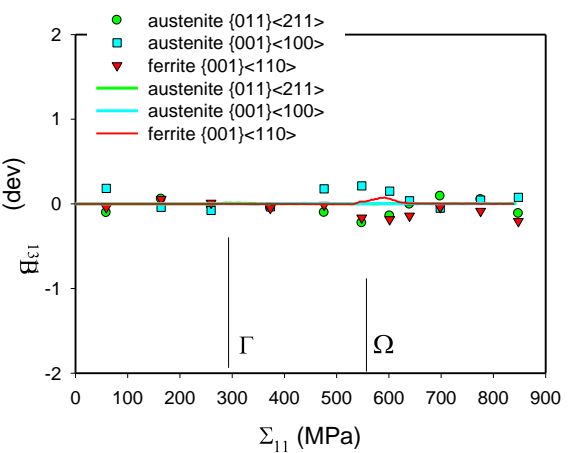
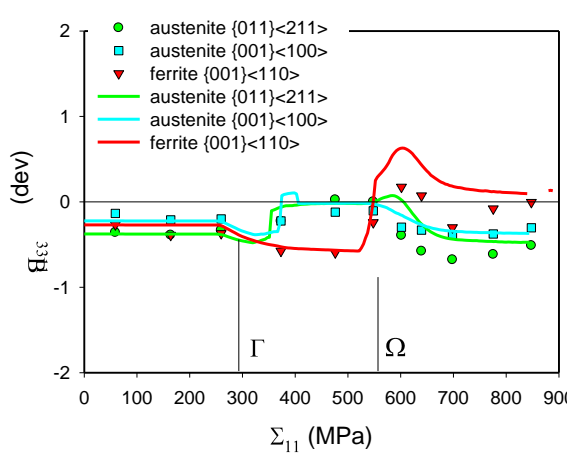
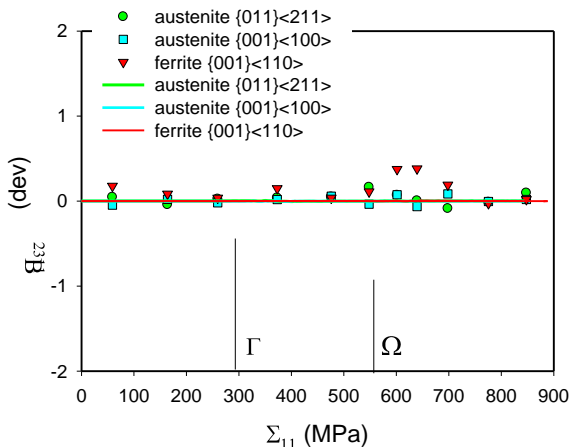
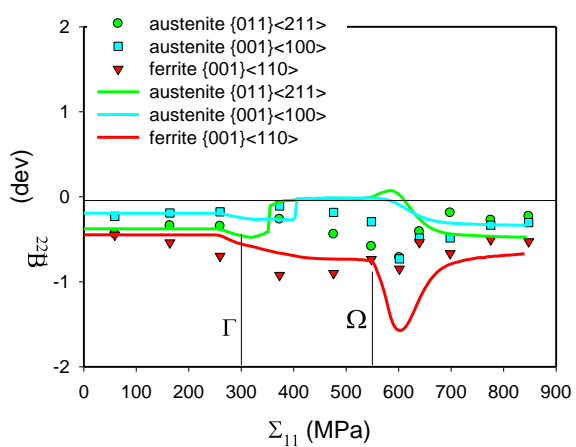
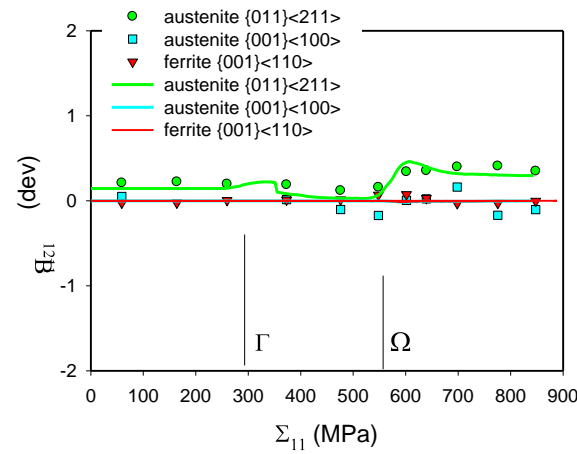
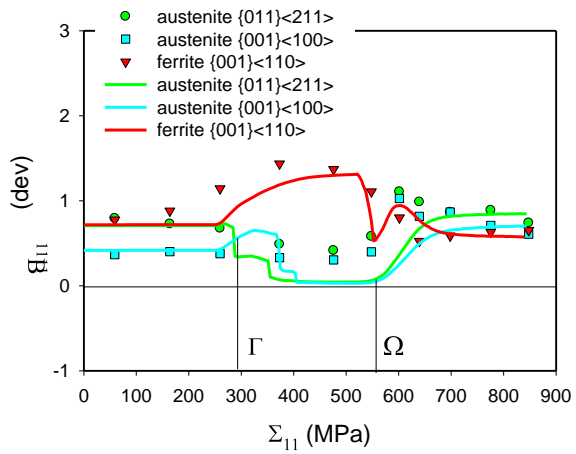
dewiatoryczne + hydrostatyczne

$$\sigma^h = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$$

Naprężenia hydrostatyczne



model → lines experiment → points



TENSOR LOKALIZACJI NAPREZEŃ

uzyskany bezpośrednio z
eksperymentu dla kierunków o
SILNEJ TEKSTURZE

$$B_{ij11}^{g(dev)} = \frac{\Delta \sigma_{ij}^{g(dev)}}{\Delta \Sigma_{11}}$$

\overline{B}_{ijkl} (deviatoric) model → lines

B_{ijkl} (deviatoric) experiment → points

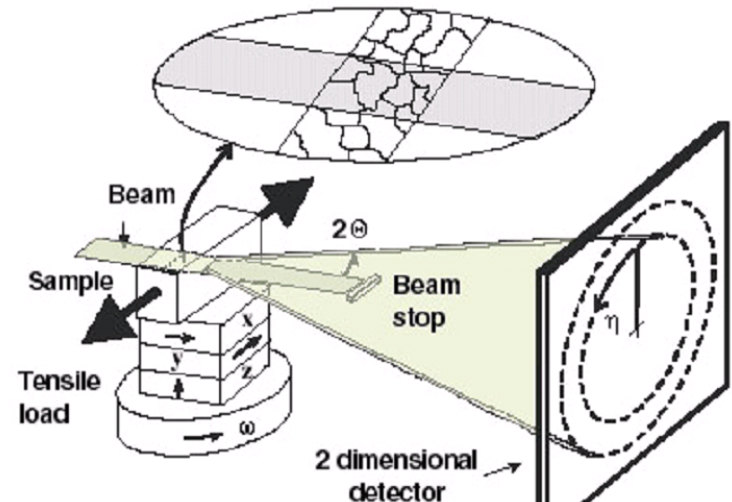
**WYZNACZYLIŚMY tensor lokalizacji
B
DOBRA ZGODNOŚĆ Z MODELEM
ale mało punktów pomiarowych**

Wnioski z dotychczasowych eksperymentów

- Pomiar dyfrakcyjny w połączeniu z modelem samouzgodnionym pozwalają badać własności mikromechaniczne polikryształów.
- Zaobserwowano efekty mechaniczne zniszczeń w fazie ferrytycznej
- Możliwy jest pomiar pełnego tensora naprężeń dla materiałów o silnej teksturze (metoda grup krystalitów).
- Ewolucja naprężeń hydrostatycznych (pomiędzy dwiema fazami w stali dwufazowej) nie może być przewidziana przez model samouzgodniony

Promieniowanie synchrotronowe ESRF (ID11) - pomiary wykonane w listopadzie 2012

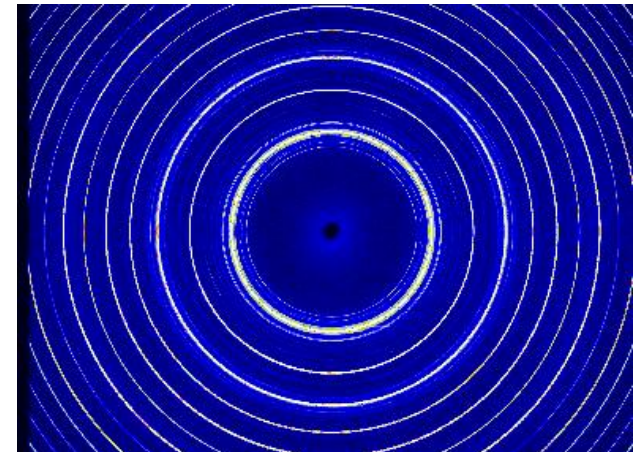
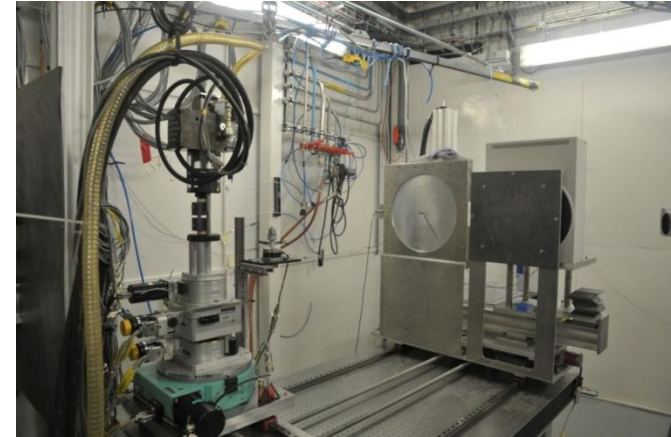
- Wysokoenergetyczne promieniowanie synchrotronowe (90keV, $I=0.14$ A), tryb transmisyjny ($2\Theta=1,8^\circ-6^\circ$)
- Skanowanie z objętością próbkującą $0.1 \times 0.1 \times 1.5$ mm³ umożliwiły pomiary w przewężeniach, tuż przed zerwaniem próbki (badanie mikrozniszczeń)



Promieniowanie synchrotronowe

ESRF (ID11) - pomiary wykonane w listopadzie 2012

- Krótki czas akwizycji (kilka sekund). Możliwe pomiary „on line” czyli w trakcie deformacji
- Tensor lokalizacji naprężeń może zostać określony z większą dokładnością. Pomiary z dużą gęstością punktów.
- Pomiary wykonano dla próbek ze stali dwufazowej, stali perlitycznej (10% cementytu – druga faza), tytanu, częściowo dla Al/SiC



Moje dotychczasowe prace:

PUBLIKACJE:

1. Gadalińska E., Kaniowski J., Wronicz W. *Porównanie modelowania MES z wykorzystaniem elementów bryłowych i osiowosymetrycznych na przykładzie zamykania nitu na prasie*, **Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej**, nr 4/2010 (660). str. 379-398.

2. M. François, B. Panicaud, L. Le Joncour, A. Baczmański, A. Paradowska, S. Wroński, E. Gadalińska, Comparison of strain/stress behaviour of a duplex stainless steel between mesoscopic and macroscopic scales by neutron measurements extended to the necking range. **Thin Solid Films (2012)**, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2012.07.065>
- **w druku**

KONFERENCJE:

1. I Conference “Fatigue of Aircraft Structures”, Warszawa 15.I.2008. Referat: Gadalińska E., Kaniowski J., Wojtas A. *Dyfraktometryczne badania naprężeń własnych wokół nitów*.

2. 11th European Powder Diffraction Conference, EPDIC-11, Warszawa 18–22.IX.2008.

3. II Conference “Fatigue of Aircraft Structures”, Warszawa 15 - 16.I.2009. – **oral**

4. 31st Conference and 25th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue ICAF 2009, Rotterdam 25 – 29.V.2009. Plakat: Gadalińska E., Kaniowski J., Wojtas A. *Dyfraktometryczne pomiary naprężeń na stopach aluminium. Optymalizacja parametrów pomiarowych*. – **poster**

5. E. Gadalińska, J. Kaniowski, A. Baczmański, W. Wronicz, Stress distribution around rivets. Comparison of results of strain gauges and X-ray stress measurements. The novel methodology presentation. 9th International Conference on Residual Stresses, ICRS 9, October 7 - 9, 2012, Conference Centre Garmisch-Partenkirchen, Germany. – **oral**

6. E. Gadalińska, J.Kaniowski, A.Baczmański, S.Wronski, M.Wróbel, Methodological Aspects of Stress Measurements with X-ray Diffraction, XXV Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego im. Prof. Jacka Stupnickiego, 17-20 Października 2012, Jachranka koło Warszawy. **-poster**

7. A. Baczmański, E. Gadalińska, S. Wroński, L. Le Joncour, B. Panicaurd, M. François, C. Braham, A. Paradowska, V. Klosek, Differential Method for Study of Stress Localization Using Neutron Diffraction. 9th International Conference on Residual Stresses, ICRS 9, October 7 - 9, 2012, Conference Centre Garmisch-Partenkirchen, Germany. - **oral**

Materiały konferencyjne

1. Gadalińska E., Kaniowski J., Wojtas A. *Dyfraktometryczne pomiary naprężeń na stopach aluminium. Optymalizacja parametrów pomiarowych*, 25. Sympozjum ICAF, Rotterdam 27-29 maj 2009.

2. Gadalińska E., Kaniowski J. *Pomiar naprężeń własnych metodą dyfraktometrii rentgenowskiej na próbkach aluminiowych. Dobór parametrów pomiarowych*, EUROPEAN KONES 2009.

3. Gadalińska E., Korzeniewski B., Kaniowski J. *Metoda dyfraktometrii rentgenowskiej przy pomiarze naprężeń własnych na próbkach wykonanych ze stopów aluminium - dobór i optymalizacja parametrów pomiarowych*, XXIV Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Wrocław, 22 września 2010.

4. Gadalińska E., Kaniowski J., *Dyfraktometryczne pomiary naprężeń własnych wokół nitów*, XII Krajowa Konferencja Naukowo-Szkoleniowa Mechaniki Pękania, Kraków, 6-9 września 2009.

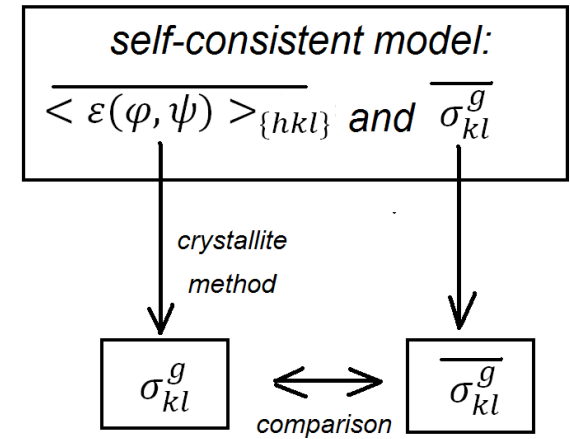
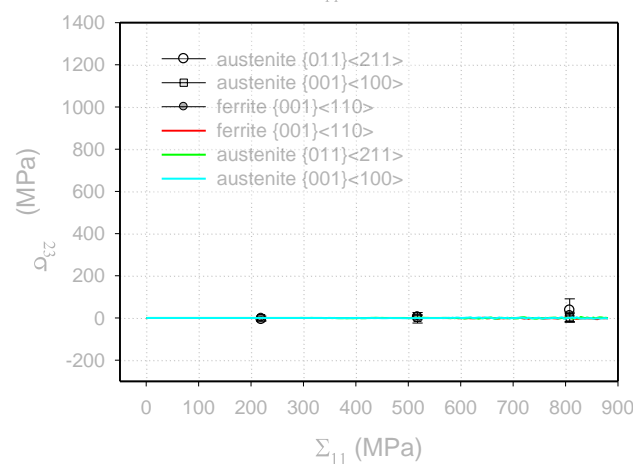
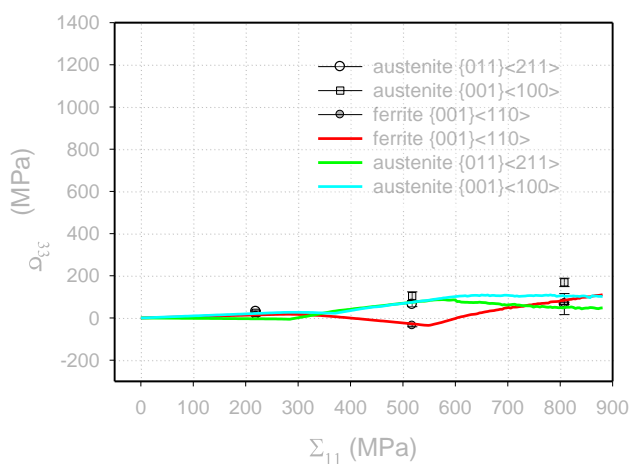
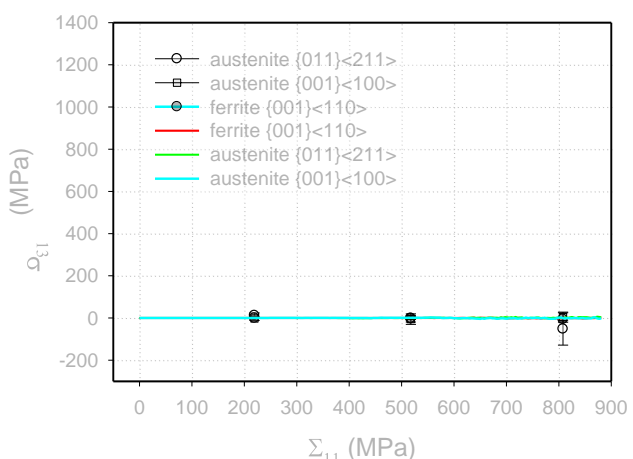
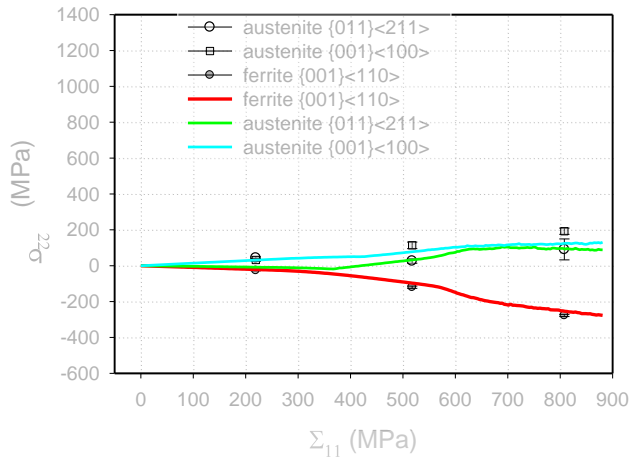
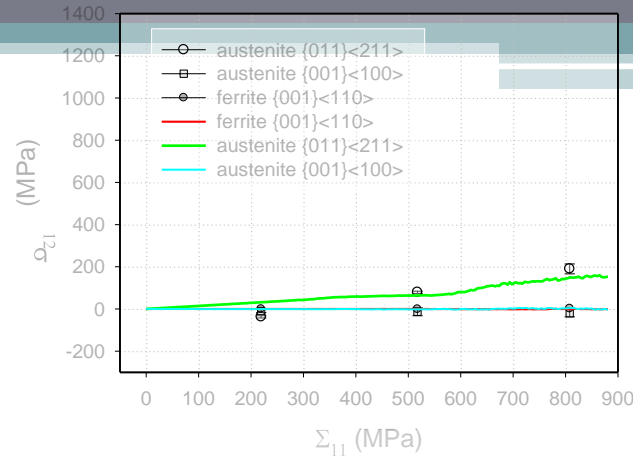
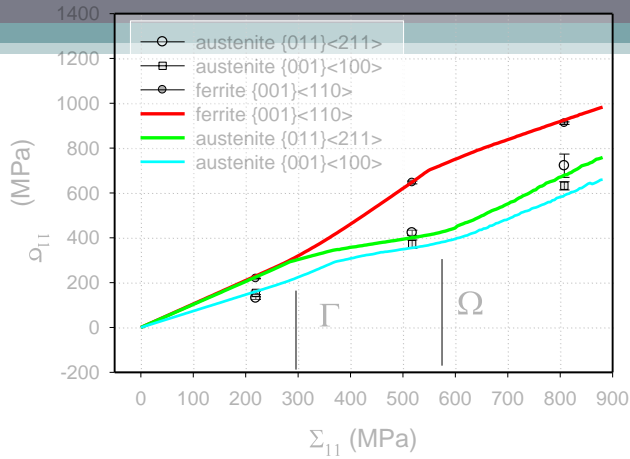
5. Gadalińska E., Wronicz W., Kaniowski J., Korzeniewski B. *Obliczenia i weryfikacja eksperymentalna naprężeń własnych w połączeniu nitowym płatowca samolotu*, XXIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Bydgoszcz – Pieczyńska, maj 2010

6. Korzeniewski B., Kaniowski J., Gadalińska E., *Methodology of residual stress measurements for rivet joints*, 4 Conference Fatigue of Aircraft Structures, Warszawa, 13-14 styczeń 2011.

7. Wronicz W., Kaniowski J., Korzeniewski B., Gadalińska E., *Experimental and numerical study of stress and strain field around the rivet*, 26 th ICAF Symposium – Montréal, 1–3 czerwiec 2011.

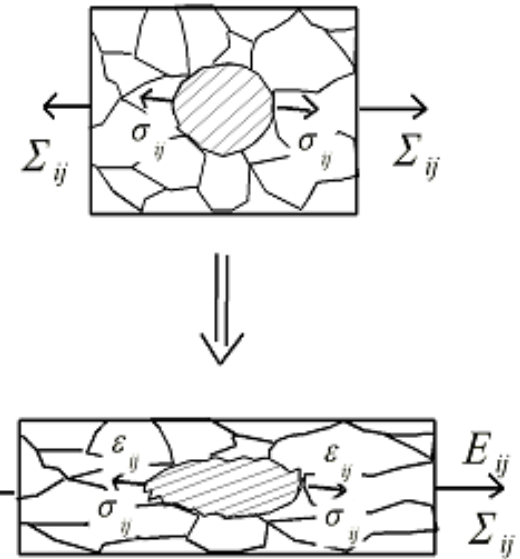
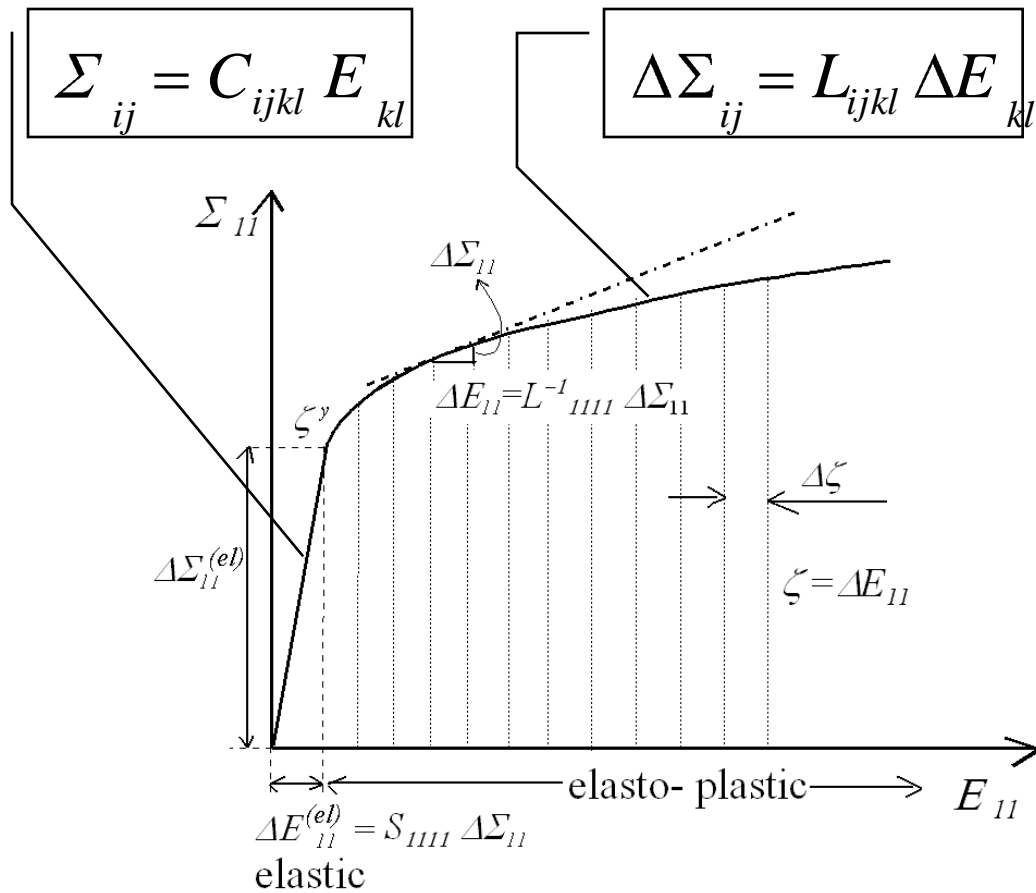
Dziękuję za uwagę

Sprawdzenie metody grup krystalitów



modelowanie dla 20000 rotujących ziaren (początkowe orientacje dane z eksperymentu)

Stiffness and tangent modulus



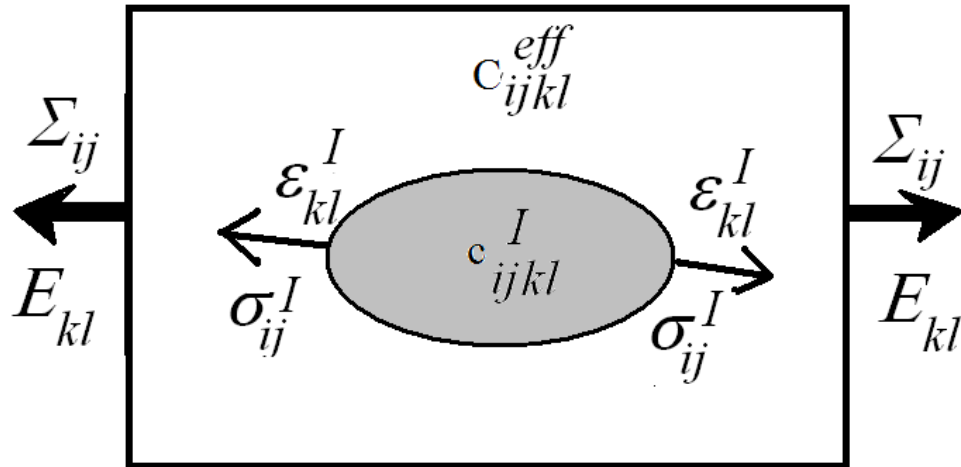
$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^I = \mathbf{A}^I \Delta \mathbf{E}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^I = \mathbf{A}^I \mathbf{E}$$

$$\mathbf{A}^I = ?$$

Model samouzgodniony

Deformacja sprężysta:



$$\boldsymbol{\varepsilon}^I = \mathbf{A}^I \mathbf{E} \quad \text{and} \quad \boldsymbol{\sigma}^I = \mathbf{c}^I \boldsymbol{\varepsilon}^I$$

where:

$$\mathbf{A}^I = \mathbf{I} - \mathbf{T}^I : (\mathbf{c}^I - \mathbf{C}^0)^{-1}$$

Problem:

$$\mathbf{C}^0 = ?$$

Rozwiązanie:

$$\mathbf{C}^0 = \mathbf{C}^{eff}$$

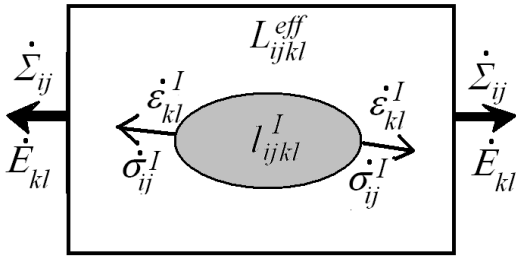
where:

$$\mathbf{C}^{eff} = \sum_{I=1}^{N_I} f^I \mathbf{c}^I \mathbf{A}^I$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{C}^{eff} \mathbf{E} \quad \text{where:} \quad \boldsymbol{\Sigma} = \sum_{I=1}^{N_I} f^I \boldsymbol{\sigma}^I \quad \text{and} \quad \mathbf{E} = \sum_{I=1}^{N_I} f^I \boldsymbol{\varepsilon}^I$$

Model samouzgodniony

Deformacja elastoplastyczna:



$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^I = \mathbf{A}^I \Delta \mathbf{E} \quad \text{and} \quad \Delta \boldsymbol{\sigma}^I = \mathbf{I}^I \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^I$$

where:

$$\mathbf{A}^I = \left[\mathbf{I} - \mathbf{T}^{II} : (\mathbf{I}^I - \mathbf{L}^0) \right]^{-1}$$

Problem:

Rozwiązanie:

$$\mathbf{L}^0 = \mathbf{L}^{\text{eff}}$$

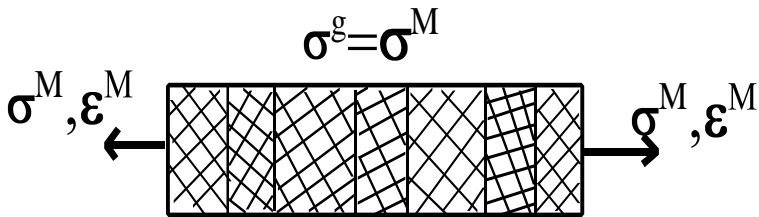
gdzie:

$$\mathbf{L}^{\text{eff}} = \sum_{I=1}^{N_I} f^I \mathbf{I}^I \mathbf{A}^I \quad \mathbf{L}^0 = ?$$

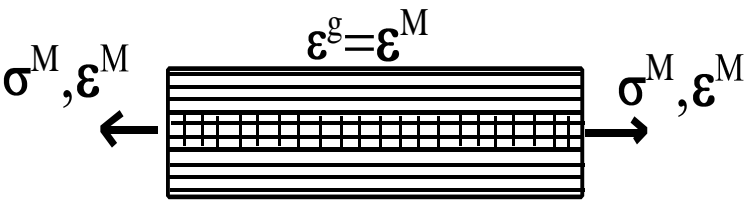
$$\Delta \boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{L}^{\text{eff}} \Delta \mathbf{E} \quad \text{where:} \quad \Delta \boldsymbol{\Sigma} = \sum_{I=1}^{N_I} f^I \Delta \boldsymbol{\sigma}^I \quad \text{and} \quad \Delta \mathbf{E} = \sum_{I=1}^{N_I} f^I \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^I$$

DEC

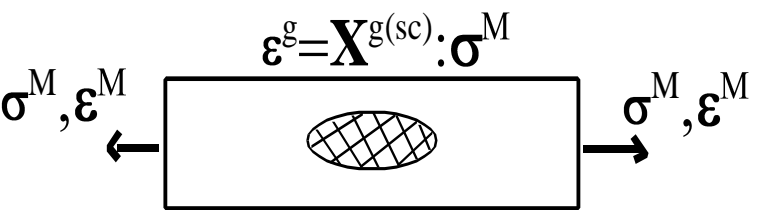
Próbka kwasi-izotropowa



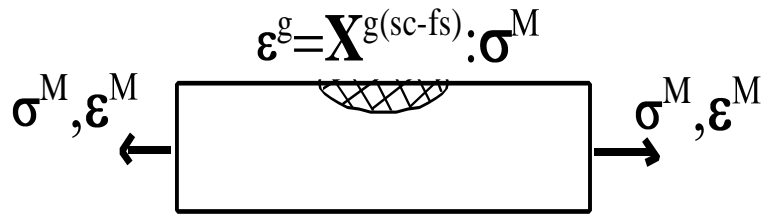
Reuss



Voigt

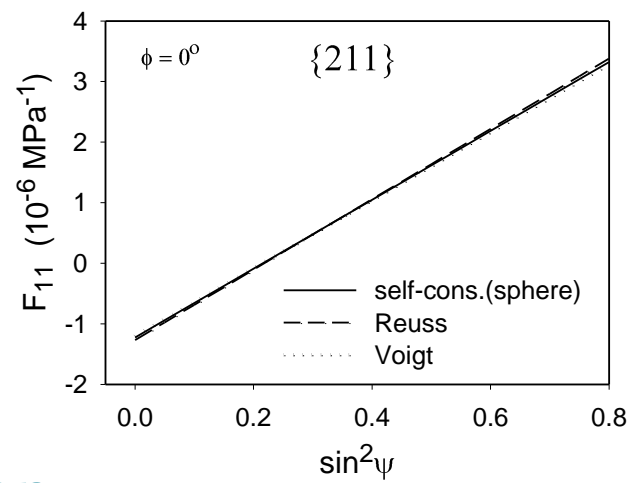


Samozgodniony

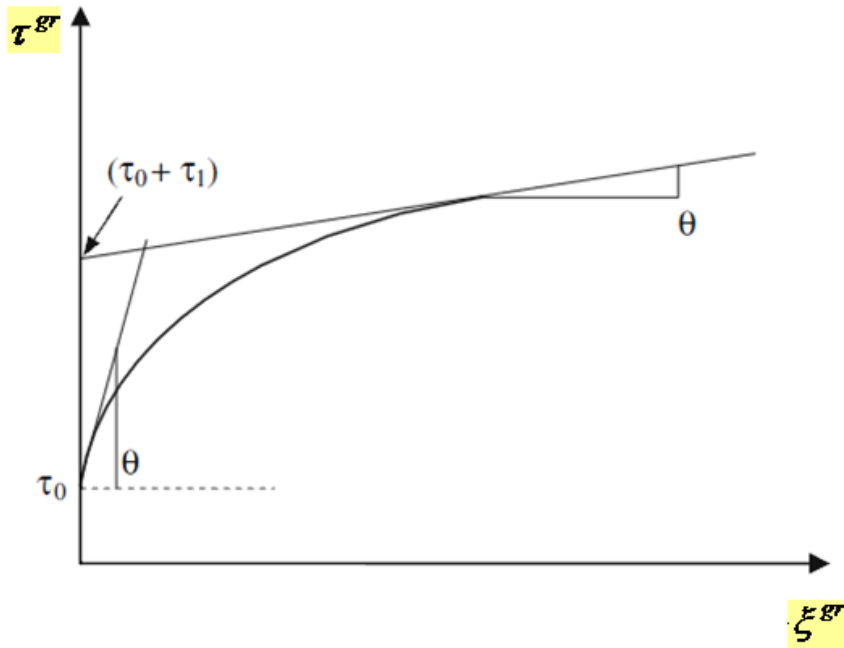


Samozgodniony
(free surface)

$$\langle \epsilon'(\psi, \phi) \rangle_{(hkl)} = F_{11}[hkl, \psi, \phi] \sigma_{11}^M$$



Prawo Voce dla ziarna



$$\tau^{gr} = \tau_0^{ph} + (\tau_1^{ph} + \theta_1^{ph} \xi^{gr}) \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_0^{ph}}{\tau_1^{ph}} \xi^{gr}\right) \right]$$

τ^{ph} – naprężenie krytyczne dla ziarna "gr"
w funkcji sumy odkształceń ścinających w ziarnie " ξ^{gr} "

τ_0^{ph} – początkowe naprężenie krytyczne dla fazy "ph"

θ_0^{ph} - początkowe umocnienie dla fazy "ph"

τ_1^{ph} i θ_1^{ph} – opisują nieliniowość umocnienia

$$\begin{aligned}
 \langle d(\phi, \psi) \rangle_{\{hkl\}} = d_{\{hkl\}}^0 & \left\{ \frac{1}{2} s_2 \left[(\sigma_{11}^M - \sigma_{33}^M) \cos^2 \phi + (\sigma_{22}^M - \sigma_{33}^M) \sin^2 \phi + \sigma_{12}^M \sin 2\phi \right] \sin^2 \psi \right. \\
 & \left. + s_1 \left[\sigma_{11}^M + \sigma_{22}^M + \sigma_{33}^M \right] + \frac{1}{2} s_2 \sigma_{33}^M + \frac{1}{2} s_2 \left[\sigma_{13}^M \cos \phi + \sigma_{23}^M \sin \phi \right] \sin 2\psi \right\} + d_{\{hkl\}}^0
 \end{aligned}$$